

Arbeitsgruppe Morsleben (AG Morsleben)

Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des ERA Morsleben

**Prüfkomplex 7
„Verfüllen und Verschließen von Strecken“, Teil 2**

Sachstandsbericht 2011

Auftraggeber: Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt
des Landes Sachsen-Anhalt

Auftragnehmer: IHU Geologie und Analytik GmbH

Der Sachstandsbericht umfasst 183 Seiten und 2 Anhänge

Datum: 22.12.2011

Unterschrift:

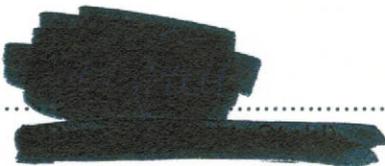
Die Stellungnahme wurde im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU) erstellt. Das MLU behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung des MLU zitiert, vervielfältigt oder Dritten zugänglich gemacht werden. Der Bericht gibt die Meinung und Ansicht der Verfasser wider, diese muss nicht in jedem Falle mit der Meinung des MLU übereinstimmen.

Erklärung:

Die Unterzeichnenden versichern, die Stellungnahme unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen frei von Ergebnisaneisungen erstellt zu haben.

Datum: Dezember 2012

Unterschrift:



Mitglieder der Arbeitsgruppe Morsleben:

IHU Geologie und Analytik
Gesellschaft für Ingenieur-, Hydro- und Umweltgeologie mbH
Dr.-Kurt-Schumacher-Straße 23
39576 Stendal

TU Clausthal
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik
Erzstraße 20
38678 Clausthal-Zellerfeld

GTU Ingenieurbüro Prof. Dr. Knoll
Berliner Straße 70
14467 Potsdam

Unterauftragnehmer:

Brenk Systemplanung GmbH
Heider-Hof-Weg 23
52080 Aachen

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Gegenstand der Berichterstattung	4
2	Rechnerische Prüfung der Nachweisführung	5
2.1	Zielstellung der Prüfungen	5
2.2	Verifikation der Berechnungen zu Verschlussbauwerken im Steinsalz – Stand der Arbeiten	6
2.3	Verifikation der Berechnungen zu temporären Streckenabdichtungen – Stand der Arbeiten	64
2.4	Verifikation der Berechnungen zum Verschlussbauwerk im Hauptanhydrit – Stand der Arbeiten	90
2.5	Verifikation bzw. Dokumentation der Berechnungen zum in situ Versuch Streckenabdichtung – Stand der Arbeiten	95
2.6	Zwischenergebnisse zu den Verifikationsberechnungen und Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise	161
3	Begleitende Prüfung der In-situ-Versuche	163
3.1	Vorbemerkungen und Zielstellung der Prüfungen	163
3.2	Stand der Injektionsversuche für Abdichtungen in Steinsalz	164
3.3	Stand der Versuchsdurchführung für Abdichtungen im Steinsalz	165
3.4	Stand der Versuchsdurchführung für Abdichtungen im Hauptanhydrit	175
3.5	Begleitende Laboruntersuchungen zu den In-situ-Versuchen	179
4	Verzeichnis der Quellen	180
4.1	Verfahrensunterlagen	180
4.2	Sonstige Literatur	182
5.3	Fachgespräche und Befahrungen	183

Verzeichnis der Anhänge

Anhang 1	Übersicht der Lokationen für Verschlussbauwerke
Anhang 2	1. Zwischenbericht zum Prüfkomplex 7 „Streckenverschlüsse“, Phase 2 Modellierung der Korrosion inhomogen durchströmter Abdichtungen Brenk Systemplanung, Aachen, 21.12.2011

1 Veranlassung und Gegenstand der Berichterstattung

Das Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU) beauftragte am 01.12.2010 die Arbeitsgemeinschaft Morsleben, vertreten durch das Ingenieurbüro IHU Geologie und Analytik GmbH mit gutachterlichen Leistungen im Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für Radioaktive Abfälle Morsleben, Prüfkomplex 7 „Verfüllen und Verschließen von Strecken“, Teil 2. Neben den Mitgliedern der AG Morsleben wurde die Firma Brenk Systemplanung als Unterauftragnehmer eingebunden.

Im Langzeitsicherheitsnachweis misst der Antragsteller den Streckenabdichtungen eine hohe Bedeutung hinsichtlich der Verzögerung der Freisetzung des Radionuklidinventars bei. Die Anforderungen an die konzipierten Streckenabdichtungen resultieren direkt aus diesen Langzeitsicherheitsanalysen und stehen im Kontext mit den gewählten Stilllegungsmaßnahmen im Rahmen der vorgelegten Konzeptplanung zum Verfüllen und Verschließen des Grubengebäudes und der Schächte. Ihre Realisierbarkeit und Wirksamkeit ist daher an die Verträglichkeit und Abstimmung mit der Verfüllplanung gebunden. Zudem ist eine ausreichende Charakterisierung der geologischen, bergbaulichen, geomechanischen und geohydraulischen Gegebenheiten des ERAM als Basis für die entsprechend erforderliche technisch-konzeptionelle Auslegung der Abdichtungsbauwerke und ihre räumliche Positionierung im Grubengebäude notwendig. Daraus ergeben sich zwangsläufig zahlreiche Schnittstellen des hier zu behandelnden Prüfkomplexes mit Ergebnissen der Standortbeschreibung sowie Ergebnissen weiterer Prüfkomplexe (z. B. Geomechanik, PK 8).

Zum Prüfkomplex 7 "Verfüllen und Verschließen von Strecken" legte der AS die Unterlagen der Konzeptplanung vor, welche in der Phase 1 auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft wurden. In Fortführung der Prüfung und Einbeziehung der In-situ-Versuche ist Gegenstand dieses Einzelauftrages die folgende Aufgabenstellung:

1. Rechnerische Prüfung der vorliegenden Nachweisführungen (Verifikationsberechnungen, unabhängige Einschätzung von Standsicherheit und Dichtheit);
2. Begleitende Prüfung der In-situ-Versuche des BfS zu den Streckenabdichtungen (Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung, laborative Untersuchungen, begleitende rechnerische Untersuchungen);
3. Fortführung der Prüfung zu den Einflussfaktoren auf die Streckenverschlüsse;
4. Mitwirkung an Fachgesprächen und Befahrungen.

Die erste Phase des Prüfungskomplexes 7 wurde mit dem Prüfbericht [L06] vom 26.04.2010 und dem Fachgespräch vom 18.06.2010 [F07] abgeschlossen. Dem entsprechend werden im aktuellen Sachstandsbericht alle sich daran anschließenden Aktivitäten dargestellt.

2 Rechnerische Prüfung der Nachweisführung

2.1 Zielstellung der Prüfungen

Übergeordnetes Ziel der rechnerischen Prüfung der Nachweisführung ist es zu beurteilen, ob die Ausführungen des AS zum Tragverhalten, zur Standsicherheit und zur Dichtheit der Abdichtungsbauwerke rechnerisch richtig sind (Verifikation) und die auf den rechnerisch ermittelten Zustandsgrößen aufbauenden Einschätzungen zur Leistungsfähigkeit der Abdichtungsbauwerke geeignet sind, die Machbarkeit der Stilllegung abschließend zu beurteilen. Hierzu im Einzelnen zu beantworten sind insbesondere Fragestellungen

- zur zahlenmäßigen Richtigkeit der dokumentierten Berechnungen,
- zur rechnerisch richtigen Abbildung der jeweiligen in situ Situation im Berechnungsmodell (Berechnungsmodell, Berechnungsverfahren, Stoffmodelle, Stoffmodellkennwerte, Lastfälle, Einwirkungen, etc.),
- zur Eignung der verwendeten Kriterien und Grenzwerte, die in den Sicherheitsanalysen definierten Anforderungen zu gewährleisten und
- zur Vollständigkeit der rechnerischen Untersuchungen im Rahmen der Nachweisführungen zur Standsicherheit und Dichtwirkung der Verschlussbauwerke.

Im Rahmen des vorliegenden Zwischenberichtes werden die bisher durchgeführten Arbeiten zur Verifikation, d.h. zur Prüfung der rechnerischen Richtigkeit der vom AS vorgelegten Berechnungsergebnisse dokumentiert. Die Durchführung, Auswertung und Bewertung eigener, von der Vorgehensweise des Antragsstellers unabhängiger Berechnungen zu Standsicherheit, Dichtheit und Gebrauchstauglichkeit der verschiedenen Abdichtungselemente erfolgt im vorliegenden Zwischenbericht nicht. Die Zusammenstellung der im Rahmen der Verifikationsberechnungen ermittelten Prüfergebnisse folgt der nachstehend dokumentierten sachlichen Gliederung:

- Abschnitt 2.2: Verifikation der Berechnungen zu Verschlussbauwerken im Steinsalz (P195, P255, P262, I343).
- Abschnitt 2.3: Verifikation der Berechnungen zu temporären Streckenabdichtungen (P264).
- Abschnitt 2.4: Verifikation der Berechnungen zum Verschlussbauwerk im Hauptanhydrit (P266).
- Abschnitt 2.5: Verifikation bzw. Dokumentation der Berechnungen zum In-situ-Versuch Streckenabdichtung.
- Abschnitt 2.6: Zwischenergebnisse zu den Verifikationsberechnungen und Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise

Die Frage nach der rechnerischen Richtigkeit der vom Antragsteller vorgelegten Berechnungen wird im Wesentlichen durch eine vergleichende Gegenüberstellung der unter Verwendung weitgehend identischer Berechnungsmodelle, Berechnungsabläufe, Stoffmodelle und Materialparameter ermittelten Ergebnisse mit den Ergebnissen des Antragstellers beantwortet. Sofern die im Rahmen eigener Vergleichsberechnungen ermittelten Zustandsgrößen den vom Antragsteller dokumentierten Ergebnissen entsprechen, wird die rechnerische Richtigkeit der vom Antragsteller vorgelegten Berechnungsergebnisse unterstellt. Angesichts der noch nicht abgeschlossenen Arbeiten im Rahmen der rechnerischen Prüfung wird auf den noch vorläufigen Charakter der Prüfergebnisse ausdrücklich hingewiesen.

2.2 Verifikation der Berechnungen zu Verschlussbauwerken im Steinsalz – Stand der Arbeiten

Rechnerische Untersuchungen zu Standsicherheit, Dichtheit und Gebrauchstauglichkeit von Verschlussbauwerken im Steinsalz werden vom Antragsteller dokumentiert in den Unterlagen P195, P255, P262 und I343. Die Verifikationsberechnungen zur Prüfung der Ausführungen des Antragstellers zu Verschlussbauwerken im Steinsalz erfolgten ausschließlich für das in P195 dokumentierte 3D-Berechnungsmodell. Auf eine explizite Prüfung der rechnerischen Aussagen in den Unterlagen P255 und I343 wird entsprechend den Ausführungen der Arbeitsgruppe Morsleben im Angebot zum Prüfkomplex 7 verzichtet, da die Unterlagen P255 und I343 lediglich Teilaspekte der rechnerischen Nachweisführung für Verschlussbauwerke im Steinsalz beinhalten, die im Rahmen der abschließenden Nachweisführung in P195 bzw. P262 berücksichtigt werden. Auch wird entsprechend den Ausführungen im Angebot zu Prüfkomplex 7 eine explizite rechnerische Prüfung der in P262 dokumentierten Berechnungsergebnisse nicht für notwendig erachtet. Im Unterschied zu P195 berücksichtigt P262 lediglich den ergänzenden Lastfall einer auf der 4. Sohle lokalisierten Abdichtung, während die in P195 vorgegebenen Beanspruchungen als maximale Teufenlage ein auf der 3. Sohle lokalisiertes Abdichtungsbauwerk erfassen. Aus der ausschließlichen Änderung des Grundspannungszustandes resultieren insofern keine neuen, die rechnerische Richtigkeit beeinflussenden Randbedingungen, als das Berechnungsmodell, die verwendeten Stoffmodelle und Materialparameter und der simulierte Prozessablauf hierbei unverändert übernommen werden. Der geänderte Grundspannungszustand in P262 dokumentiert damit im Sinne einer Parametervariation ausschließlich den quantitativen Einfluss einer Einwirkungsgröße auf die berechneten Zustandsgrößen. Die hieraus resultierenden Fragestellungen betreffen primär die Bewertung des Trag- und Dichtigkeitsverhaltens und werden im Rahmen eigener, von

der Vorgehensweise des Antragstellers unabhängigen rechnerischen Prüfung analysiert und bewertet.

Das für die Verifikationsberechnungen erstellte 3D-Berechnungsmodell zeigt Bild 2.2.1. Die geometrischen Modellabmessungen sowie Raumlage und Mächtigkeit der berücksichtigten Homogenbereiche sind identisch zu den in P195 (Anhang 1, Blatt 150) dokumentierten Angaben. Eine grundsätzlich gleich lautende Aussage gilt auch für die geometrischen Abmessungen der Streckenkontur jeweils vor und nach dem Nachschnitt. Bild 2.2.2 zeigt zur Dokumentation eine zu Anhang 2, Blatt 151, P195 korrespondierende Darstellung des Streckenquerschnittes.

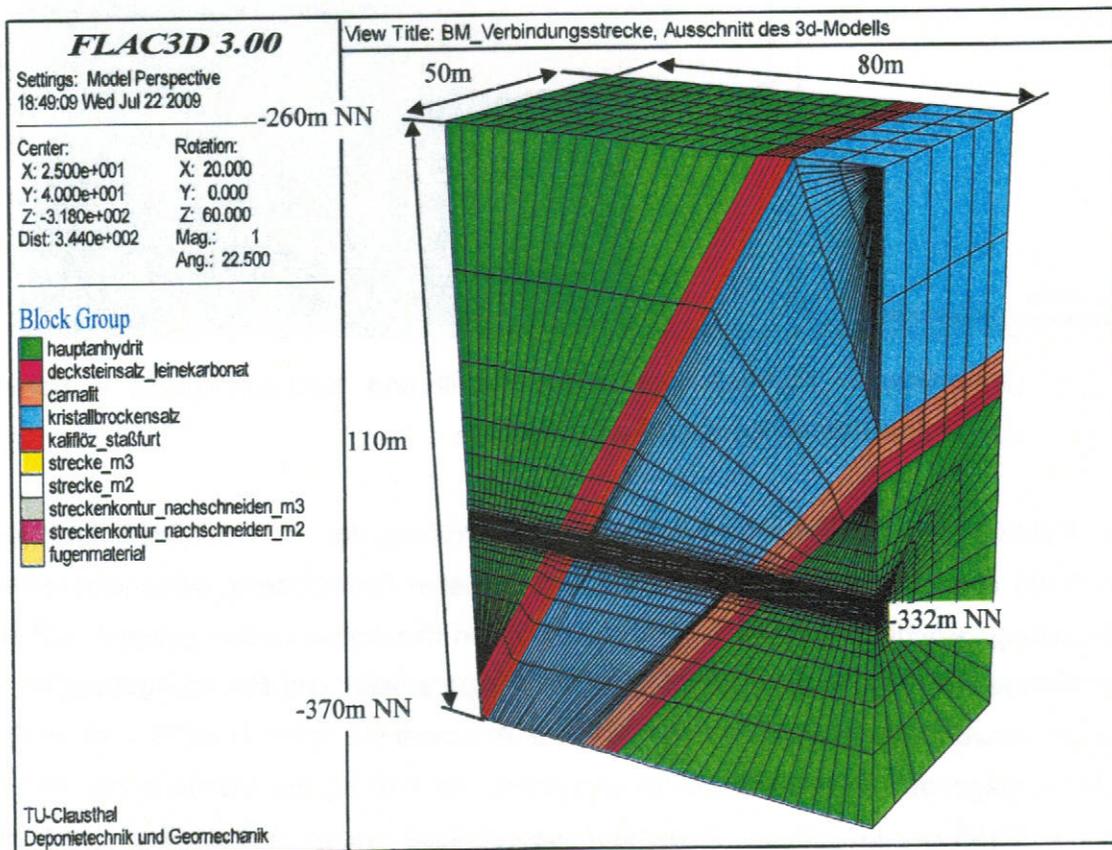


Bild 2.2.1: 3D-Berechnungsmodell Streckenverschluss – Steinsalz mit Diskretisierung und Homogenbereichen

Unterschiede zwischen dem in P195 vom AS verwendeten Berechnungsmodell und dem für die Durchführung der Verifikationsberechnungen durch TUC erstellten Berechnungsmodell resultieren lediglich aus der Diskretisierung des Berechnungsgebietes. Während das vom Antragssteller verwendete Berechnungsmodell gemäß Aussage in P195, Blatt 89 aus 74900 Zonen und 77850 Knoten besteht, erfolgte die Diskretisierung des von TUC verwendeten Berechnungsmodells durch 44280 Zonen und 47019 Knoten.

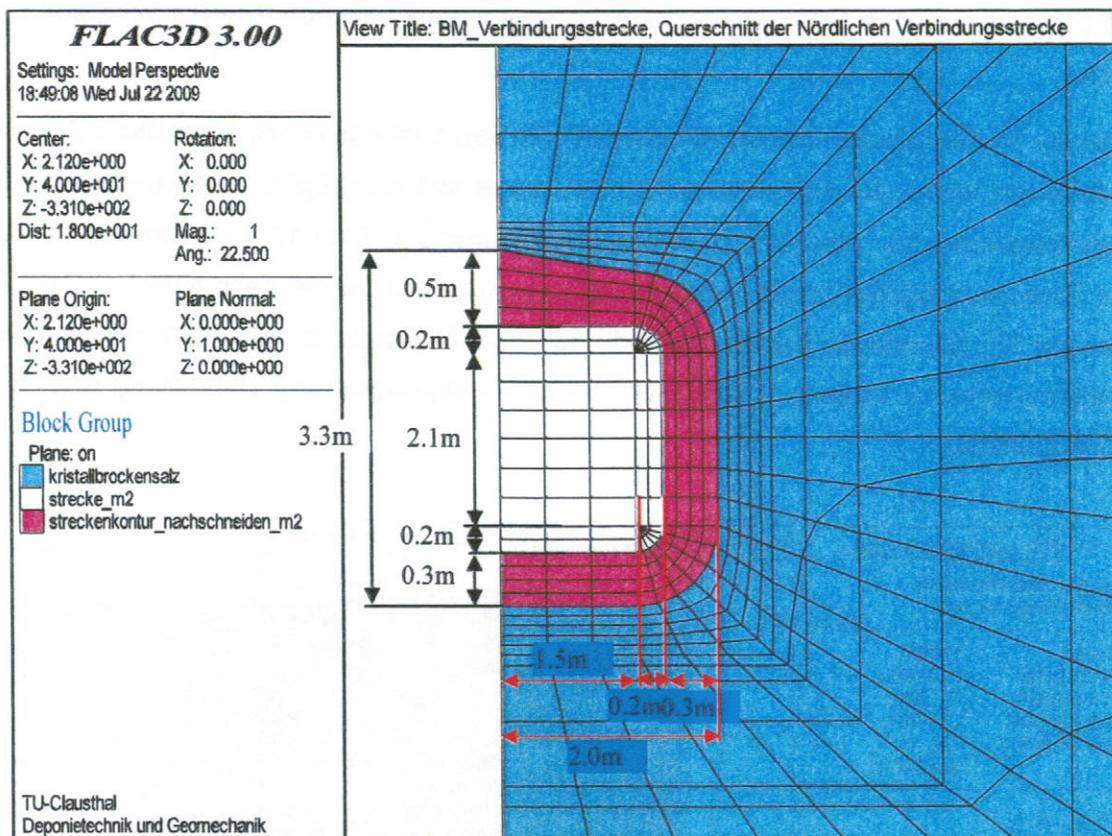


Bild 2.2.2: Geometrische Abmessungen Streckenprofil und Nachschnittprofil – Berechnungsmodell Streckenverschluss - Steinsalz

Die im Rahmen der Verifikationsberechnungen zur Prüfung der zahlenmäßiger Richtigkeit der in P195 dokumentierten Berechnungen verwendeten Stoffmodelle, Materialparameter und Belastungsgeschichten wurden identisch zu denen des Antragstellers gewählt. Auf eine wiederholende Darstellung der Stoffmodelle, Materialparameter und Belastungsgeschichten wird unter Verweis auf die Ausführungen in P195, Abschnitt 6.2 – 6.4, Blatt 79 – 95 im Rahmen des vorliegenden Zwischenberichtes verzichtet. Die Prüfung der rechnerischen Richtigkeit der in P195 dokumentierten Berechnungsergebnisse erfolgt nachstehend durch eine Gegenüberstellung der in P195 dokumentierten Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen eigener Berechnungen. Die graphische Auftragung der Berechnungsergebnisse orientiert sich in Inhalt und Darstellungsform an der in P195 gewählten Dokumentation, sodass Übereinstimmungen und/oder Abweichungen in den Berechnungsergebnissen visuell erkannt werden können.

Zum Nachweis des Temperaturkriteriums zur Rissbeschränkung werden in P195 insgesamt 12 Berechnungsvarianten entsprechend Tab. 2.2.1 durchgeführt. Ziel der Berechnungen ist es aufzuzeigen, ob innerhalb des Baukörpers eine Temperaturdifferenz von $\Delta T \leq 20K$ eingehalten wird. Sofern die durch den Hydratationswärmeeintrag induzierte Erwärmung des

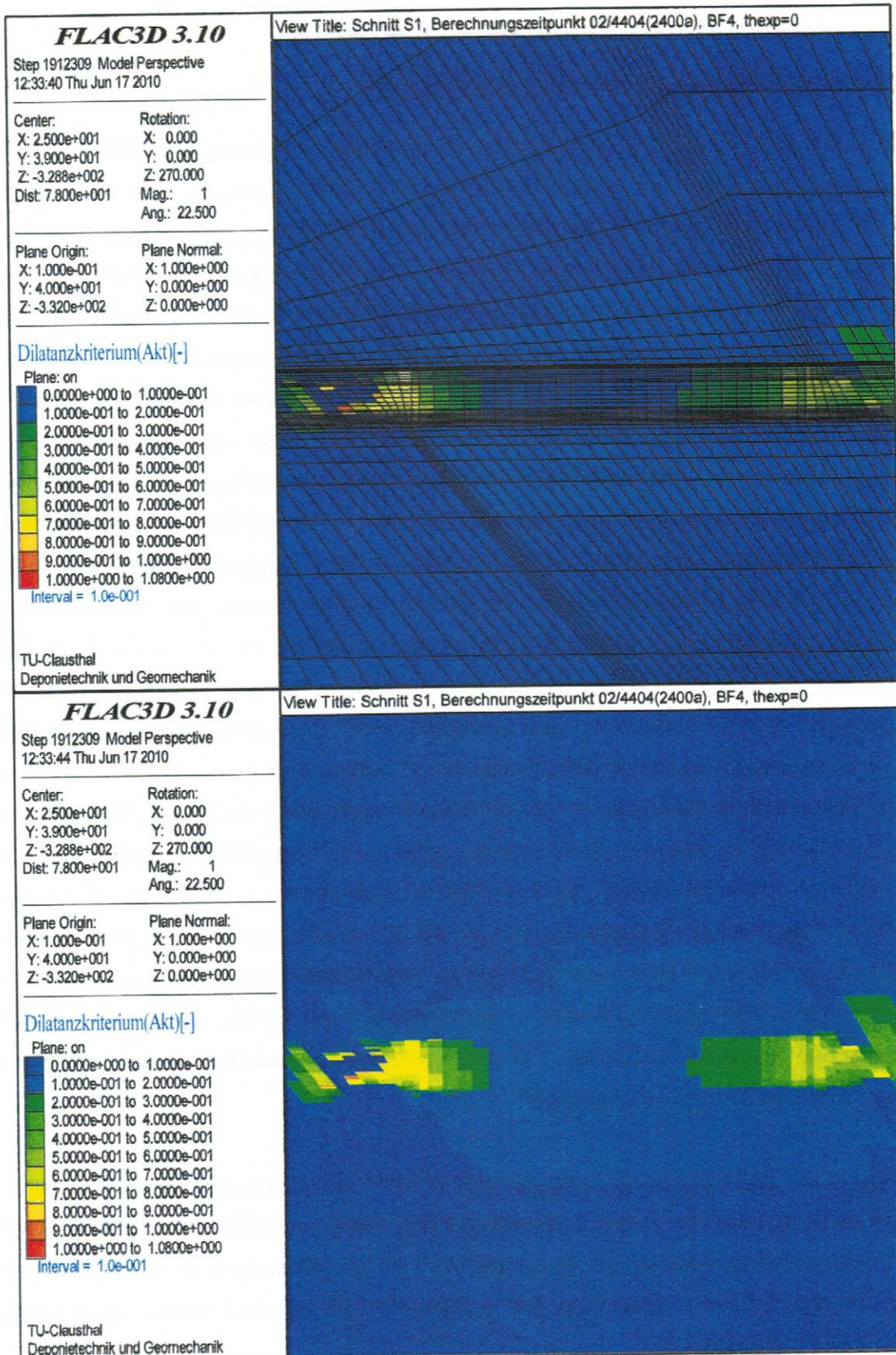


Bild 2.2.41: Dilatanzkriterium [-], Schnitt S1, Berechnungszeitpunkt 02/4404 (2400a), BF4 (vgl. Anhang 65, Blatt214, P195)

2.3 Verifikation der Berechnungen zu temporären Streckenabdichtungen – Stand der Arbeiten

Gemäß Aussage in P264 kann im Rahmen der geplanten Stilllegung des ERA Morsleben nicht ausgeschlossen werden, dass entsprechend den Erfahrungen der bGZ im Zuge der Verfüllung von Grubenbauen mit Salzbeton Überschusslösungen entstehen und über Wegsamkeiten im umgebenden Steinsalzgebirge in die noch befahrbaren Grubenbaue austreten. Im Bereich der Einlagerungsgrubenbaue ist in der Konsequenz zu unterstellen, dass die Überschusslösungen in Kontakt mit den radioaktiven Abfällen kommen und die dann kontaminierten Lösungen in die angrenzenden, betrieblich noch genutzten Grubenbaue austreten. Basierend auf den Planungen zum Stilllegungsbetrieb wird daher vom Antragsteller gefordert, an insgesamt vier Lokationen des ERA Morsleben so genannte temporäre Abdichtungen zu errichten, die über einen Zeitraum von 12a einen potenziell nicht auszuschließenden Austritt kontaminierter Lösungen in betrieblich noch genutzte Grubenbaue verhindern sollen. Aufbauend auf einer Beschreibung der vier, für die Errichtung temporärer Streckenabdichtungen vom AS genannten Lokationen (alle Lokation lokalisiert im Steinsalz) wird in P264 stellvertretend ein Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis für die hinsichtlich ihrer geometrischen Abmessungen und bezüglich ihres Tragverhaltens bei anstehendem Fluiddruck ungünstigste Lokation geführt (Ostfeld, 4. Sohle). Sie ist charakterisiert durch eine maximal anzusetzende Überstauung der temporären Abdichtung durch eine Fluidsäule von 80m Höhe (Ostfeld zwischen 2. Sohle und 4. Sohle). Ziel der in P264 dokumentierten Berechnungen ist es nachzuweisen, dass ein Abdichtungsbauwerk aus hydraulisch abbindendem Baustoff der Festigkeitsklasse C20/25 gemäß DIN 1045-1:2001-07 geeignet ist, die Anforderungen an Standsicherheit und Dichtheit zu gewährleisten. Der Nachweis der Standsicherheit erfolgt in P264 durch numerische Berechnungen auf der Grundlage eines rotations-symmetrischen Berechnungsmodells. Für den Nachweis der Dichtheit werden vereinfachte analytische Betrachtungen herangezogen.

Zur Prüfung der zahlenmäßigen Richtigkeit der in P264 dokumentierten Berechnungsergebnisse ist entsprechend der Vorgehensweise in P264 durch die Prüfer ein weitgehend identisches rotationssymmetrisches Berechnungsmodell STTA erstellt worden. Eine Schemaskizze des für die Verifikationsberechnungen erstellten rotationssymmetrischen Berechnungsmodells STTA zeigt Bild 2.3.1.

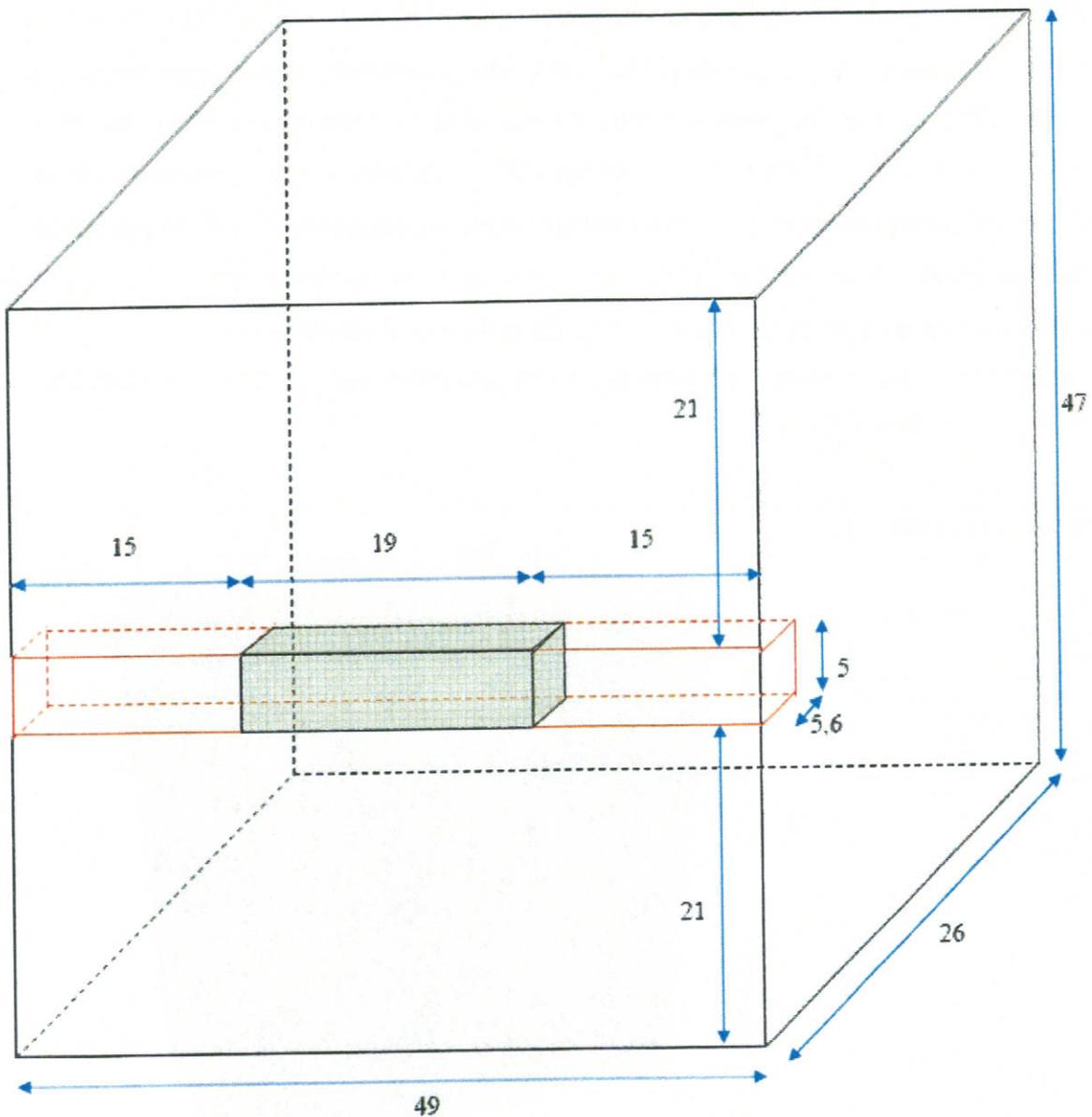


Bild 2.3.1: Schemaskizze Berechnungsmodell STTA, Zahlenangaben in m

Der Berechnungsausschnitt des Modells umfasst analog zu den Berechnungen des AS einen Gebirgsausschnitt mit einer horizontalen Ausdehnung von 49 m Breite und 26 m Tiefe. Zur Tiefe hin erstreckt sich der Berechnungsausschnitt von der Teufe $z = -486$ m (-346 mNN) bis in die Teufe $z = -533$ m (-393 mNN), woraus eine Modellhöhe von $H = 47$ m resultiert. Bild 2.3.2 zeigt die Diskretisierung des Berechnungsmodells. Die Modellränder des Berechnungsmodells sind am unteren Modellrand vertikal in z-Richtung sowie an den seitlichen Rändern horizontal in x- und y-Richtung unverschieblich gelagert.

Der obere Rand der Berechnungsmodelle ist in vertikaler Richtung frei verschieblich und mit einer dem Eigengewicht des überlagernden Gebirges entsprechenden Flächenlast von $p_{DG} = \rho \cdot g \cdot H = 2200 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 486 \text{ m} \cong 10,5 \text{ MPa}$ beaufschlagt.

Das Verschlussbauwerk mit den geplanten Abmessungen $B \cdot T \cdot H = 19 \text{ m} \cdot 5,6 \text{ m} \cdot 5 \text{ m}$ ist in der Strecke horizontal mittig angeordnet. Zur Vermeidung artifiziereller Spannungskonzentrationen in den Eckbereichen der Streckenkontur erfolgte eine Ausrundung der Ecken mit einem Radius von $r = 0,3 \text{ m}$ (\rightarrow in P264 ist $r = 0,2 \text{ m}$ gewählt). Aufgrund der Symmetrieeigenschaften ist nur ein Gebirgsausschnitt mit dem halben Verschlussbauwerk in y-Richtung modelliert. Die diskretisierte Bauwerkstiefe im Berechnungsmodell entspricht somit $T = 2,8 \text{ m}$.

Die Diskretisierung erfolgte durch insgesamt 48020 Zonen und 54295 Knoten.

Die Berechnungen des Prüfers TUC erfolgten mit Programmsystem *Flac*^{3D} in der Programmversion 4.0-52 der Firma *Itasca*.

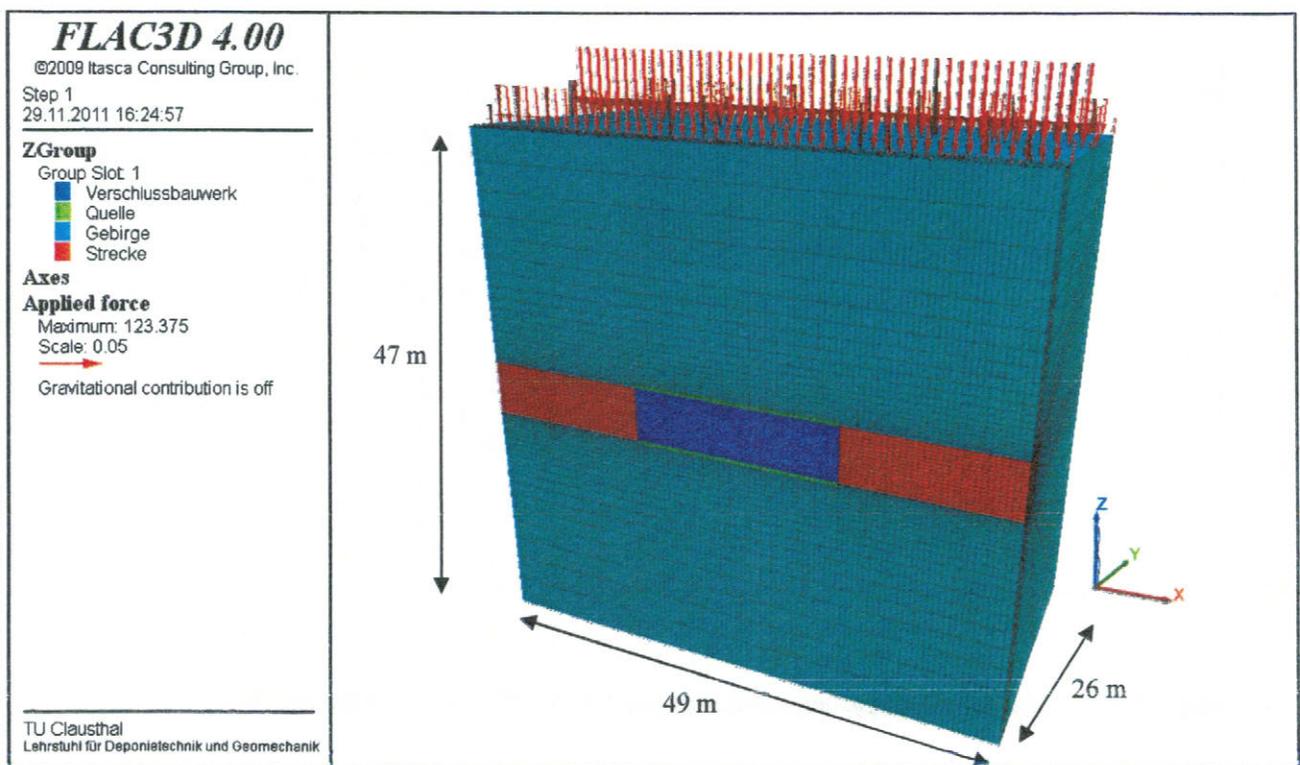


Bild 2.3.2: Diskretisiertes Berechnungsmodell STTA mit äußerer Belastung auf der Modelloberseite

Die Fluiddruckbelastung des Bauwerks erfolgt in Analogie zur Vorgehensweise in P264 unter Ansatz einer Überstauhöhe von 80 m durch einen hydraulischen Druck von $p_L = 9,4 \text{ bar}$. Dieser Wert ist bei einer gewählten Fluidichte von $\rho_f = 1200 \text{ kg/m}^3$ wie folgt ermittelt worden:

$$p_L = 1200 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 80 \text{ m} = 0,94 \text{ MPa} \quad (2.3.1)$$

Die Abbildung des Kriechverhaltens von Steinsalz erfolgt in Analogie zum Antragsteller durch das Stoffmodell *NORTON* gemäß G. (2.3.2):

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + A \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (2.3.2)$$

Als gebirgsmechanische Kennwerte werden in Analogie zu P264 angesetzt:

Elastizitätsmodul:	$E = 25000 \text{ MPa}$
Querkontraktionszahl:	$\nu = 0,27 [-]$
Dichte:	$\rho_G = 2200 \text{ kg / m}^3$
Reibungsbeiwert:	$\mu \geq 0,4$
Kohäsion:	$c \geq 0,4 \text{ MPa}$
Vorfaktor:	$A = 7,13 \cdot 10^{-11} \text{ 1 / d}$
Spannungsexponent:	$n = 5$

Die gewählten Kennwerte ergeben nach Angaben des AS ein schnell kriechendes Steinsalz entsprechend der höchsten Kriechklasse nach *BGR*. Begründet wird dies durch die kurzfristige Erwärmung des Gebirges aufgrund der entstehenden Hydratationswärme beim Abbinden des Betons des Abdichtungsbauwerkes. Darauf hinzuweisen ist, dass in P264 und auch in den nachfolgend dokumentierten Verifikationsberechnungen die Hydratation des Betons nicht berücksichtigt wird, d.h. sowohl die zeitabhängige Aushärtung wie auch die Hydratationswärmeentwicklung werden in P264 vernachlässigt.

Gemäß Aussage in P264 wird das Abdichtungsbauwerk planmäßig mit einem Beton der Festigkeitsklasse C20/25 gemäß DIN 1045-1:2001-07 mit folgenden Materialeigenschaften hergestellt:

Elastizitätsmodul:	$E = 20000 \text{ MPa}$	(Ansatz in den Standsicherheitsberechnungen)
Querkontraktionszahl:	$\nu = 0,20 [-]$	
Dichte:	$\rho_B = 2400 \text{ kg / m}^3$	
Zugfestigkeit:	$f_{ctk;0,05} = 1,5 \text{ MPa}$	(unterer Norm-Quantilwert)
Druckfestigkeit:	$f_{ck;cyl} = 20 \text{ MPa}$	

Der Bemessungswert der Druckfestigkeit wird unter Berücksichtigung eines Teilsicherheitsbeiwertes von $\gamma_c = 1,5$ und eines Dauerstandsfestigkeitsfaktor von $\alpha = 0,85$ auf $\sigma_{C,Druck} = 11,3 \text{ MPa}$ abgemindert.

Für die Modellierung des Verschlussbauwerkes wird in Analogie zu P264 elastisches Materialverhalten unter Verwendung des *HOOKE*'schen Stoffmodells angesetzt.

Die Belastungsgeschichte wird entsprechend der in P264 dokumentierten Vorgehensweise durch zeitunabhängige Differenzlastfälle (\rightarrow Bauzustände) zur rechnerischen Simulation der Streckenauffahrung, des Streckennachschnitts, des Einbaus des Abdichtungsbauwerkes und des Aufbaus eines Injektionsdruckes und einen viskosen Differenzlastfall (\rightarrow Bauzustand) zur rechnerischen Abbildung des auf das Abdichtungsbauwerk aufkriechenden Gebirges simuliert. Durch diese, in P264 vorgegebene Abfolge einzelner Bauzustände wird beim Bauwerkseinbau ein Spannungszustand simuliert, der dem Zustand bei Neuauffahrung der Strecke entspricht. Eine Modellierung der Standzeit der Strecke vor Errichtung des Abdichtungsbauwerkes wird durch diese Vorgehensweise nicht berücksichtigt.

Die nachfolgend aufgeführten Bauzustände beschreiben die wesentlichen baulichen Veränderungen und die rechnerische Simulation der Beanspruchungen:

1. Bauzustand (primärer Gebirgszustand): Der Primärzustand kann als isotrop angenommen werden. Das Hereingewinnen des Auflockerungsbereiches wird im ersten Berechnungsschritt berücksichtigt.
2. Bauzustand (spannungsfreier Einbau): Die temporäre Abdichtung wird spannungsfrei eingebaut. Sie erfährt in diesem Bauzustand nur eine Belastung aus ihrem Eigengewicht.
3. Bauzustand (anstehender Injektionsdruck): Der dritte Bauzustand beschreibt den Zeitpunkt kurz nach der Injektionsmaßnahme. Hierdurch wird das Bauwerk mittels Injektion im Gebirge eingespannt. Die temporäre Abdichtung ist kraftschlüssig mit dem Gebirge verbunden. Der Injektionsdruck beträgt 1 MPa über den weitaus größten Teil der Bauwerkslänge und fällt an den Stirnflächen auf den Wert Null ab.
4. Bauzustand (anstehender Fluiddruck): Im lösungsseitigen Streckenabschnitt stellt sich ein vorgegebener Fluiddruck ein, der auf die Stirnseite der temporären Abdichtung wie auch auf die Kontur der Strecke wirkt. Der Fluiddruck beträgt 0,94 MPa.
5. Bauzustand (Aufkriechen des Gebirges): Simulation des Aufkriechens des Gebirges mit Ansatz viskoser Materialeigenschaften für das Steinsalzgebirge über eine Zeitdauer von $t = 12a$.

Für die Einschätzung der Funktionstüchtigkeit und Standsicherheit des Abdichtungsbauwerkes werden in P264 die Berechnungsergebnisse durch mehrere Kriterien bewertet. Hinsichtlich des Bauwerkes wird im Nachgang der Berechnungen überprüft, ob die angesetzten Grenzwerte für die Druck- und Zugfestigkeit in allen Bauzuständen eingehalten werden. Damit sollen geschädigte Bereiche des Baumaterials detektiert und deren Einfluss auf die Funktionstüchtigkeit und Standsicherheit bewertet werden. In P264 wird durch den AS ausgeführt, dass die einachsige Vergleichsspannung σ_v ein Maß für die Beanspruchung des Baustoffes ist. Ist diese kleiner als die einachsige Druckfestigkeit $\sigma_{C,Druck}$ des Baustoffes, kann gemäß Aussage in P264 ein Druck- beziehungsweise Schubversagen mit ausreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Die größte Hauptnormalspannung σ_1 stellt dagegen ein Maß für die Zugbeanspruchung des Baustoffes dar, falls diese positive Zahlenwerte annimmt. Ist die größte Hauptnormalspannung σ_1 kleiner als der Bemessungswert für die Zugfestigkeit, dann ist gemäß P264 Zugversagen mit ausreichender Wahrscheinlichkeit auszuschließen.

Als Grenzzustandsgleichungen für Spannungen im Verschlussbauwerk werden in P264 formuliert:

Druckfestigkeit: $\sigma_v \leq 11,3 \text{ MPa}$

Zugfestigkeit: $\sigma_1 \leq 1,5 \text{ MPa}$

Des Weiteren hängt die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerkes nach Darstellung des AS unter anderem von den Kräften und Verschiebungen ab, die sich zwischen Bauwerk und Gebirge einstellen. Zur Bewertung werden die im Kontaktbereich wirkenden Schubspannungen nach folgender Anforderung ausgewertet:

Schub in der Fuge bzw. im Kontaktbereich: $\tau_{Fuge} \leq 0,4 \text{ MPa}$

Die einzelnen Homogenbereiche werden als jeweils homogenes und isotropes Kontinuum angenommen. Beim Salzgebirge sind tektonisch bedingte, gebirgsschwächende Strukturelemente (singuläre Diskontinuitäten) im Berechnungsmodell nicht berücksichtigt. Die Homogenbereiche sind jeweils zug-, druck- und schubfest miteinander verbunden. Dies schließt auch den Kontaktbereich Verschlussbauwerk-Gebirge mit ein. Analog zur Vorgehensweise in P264 wird im Rahmen der Verifikationsberechnungen somit ein fester Verbund zwischen Salzgebirge und Abdichtungsbauwerk modelliert.

Die physikalischen Idealisierungen für die Berechnungen gliedern sich gemäß den in P264 gewählten Bauzuständen wie folgt:

1. Bauzustand

- (a) Primärspannungszustand
- (b) Ausbruch Strecke → elastischer Sekundärspannungszustand

2. Bauzustand

- (c) Einbau Streckenverschluss → lastfrei, nur Eigengewicht

3. Bauzustand

- (d) Aktivierung Injektionsdruck → $p_{inj} = 1 \text{ MPa}$ in der Gebirgskontur im Bereich des Abdichtungsbauwerkes durch Eintrag eines Porenwasserdruckes von $p = 1 \text{ MPa}$. Die effektiven Spannungen werden im Streckenkonturbereich um 1 MPa reduziert. Das Verschlussbauwerk erfährt einen mechanischen Druck aufgrund des Porenwasserdruckes im Gebirgskonturbereich.
- (e) Der Porenwasserdruck wird auf den Zahlenwert $p = 0 \text{ MPa}$ gesetzt. → Die effektiven Spannungen erhöhen sich im Gebirgskonturbereich und entsprechen den totalen Spannungen. Die mechanische Einspannung des Verschlussbauwerkes bleibt erhalten.

4. Bauzustand

- (f) Aktivierung Fluiddruck → $p_f = 0,94 \text{ MPa}$ auf die Streckenkontur sowie die Stirnseite der Abdichtung

5. Bauzustand

- (g) Simulation Aufkriechen des Gebirges → viskose Berechnung bis $t = 12a$

Die rechnerisch ermittelten Zustandsgrößen für ausgewählte Bauzustände werden nachfolgend zu unterschiedlichen Zeitpunkten graphisch dargestellt. Die Auswahl der Zeitpunkte und Zustandsgrößen orientiert sich im Wesentlichen an den Ausführungen in P264. Die für die Bewertung herangezogenen Kriterien und Grenzwerte entsprechen denen in P264:

Druckfestigkeit: $\sigma_v \leq 11,3 \text{ MPa}$

Zugfestigkeit: $\sigma_1 \leq 1,5 \text{ MPa}$

Schub in der Fuge bzw. im Kontaktbereich: $\tau_{Fuge} \leq 0,4 \text{ MPa}$

Darauf hinzuweisen ist, dass der AS für die Beurteilung der zulässigen Zugbeanspruchung die Hauptnormalspannung σ_1 im Abdichtungsbauwerk auswertet. Diese soll kleiner oder gleich der Zugfestigkeit $f_{ctk;0,05} = 1,5 \text{ MPa}$ sein, um Zugversagen mit ausreichender Wahrscheinlichkeit auszuschließen. Die Zugfestigkeit $f_{ctk;0,05}$ weist der AS als den anzusetzenden Bemessungswert aus. Jedoch stellt der Zahlenwert der Zugfestigkeit $f_{ctk;0,05}$ gemäß DIN 1045-1 den charakteristischen Wert des 5%-Quantils der zentrischen Betondruckfestigkeit dar. Aufgrund der Tatsache, dass der AS diesen charakteristischen Wert mit dem anzusetzenden Bemessungswert gleichstellt, erfolgt keine Abminderung des Bemessungswertes durch einen Teilsicherheitsbeiwert. Aufgrund der hohen Streuung der Zugfestigkeit des Betons sieht die DIN 1045-1 aber einen Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma = 1,8$ vor. Demnach ergibt sich die zulässige Spannung $zul\sigma_{C,Zug}$ bei Beanspruchung des Betons auf Zug zu:

$$zul\sigma_{C,Zug} = 1,5 / 1,8 = 0,83 \text{ MPa}$$

Die angesetzte zulässige Zugspannung ist vom AS demnach zu hoch gewählt und entspricht nicht dem Zahlenwert, der aus der dafür gültigen DIN-Norm zu ermitteln wäre.

Primärspannungszustand

In Übereinstimmung mit der allgemein üblichen Annahme wird davon ausgegangen, dass die primären Gebirgsspannungen vertikal und horizontal gerichtet sind. Die vertikalen Primärspannungen p_{Gv} werden als mit der Teufe veränderlich und dem lithostatischen Überlagerungsdruck entsprechend angenommen, während die horizontalen Primärspannungen p_{Gh} in den beiden Hauptrichtungen gleich sind und ein K_0 -faches der vertikalen Primärspannungen betragen. In Analogie zur Vorgehensweise des AS wird im Steinsalzgebirge dem allgemein üblichen Ansatz folgend für die Seitendruckziffer ein Zahlenwert von $K_0 = 1$ angesetzt. Daraus folgt ein isotroper Primärspannungszustand im Steinsalzgebirge.

Bild 2.3.3 zeigt in einer flächenhaften Darstellung die zahlenmäßig richtige Einprägung der vertikalen Primärspannungen in das Berechnungsmodell. Danach ergibt sich am oberen Modellrand eine vertikale Primärspannung von $P_0 = -10,5 \text{ MPa}$ und am unteren Modellrand in $z = -533,0 \text{ m}$ Teufe eine vertikale Primärspannung von $P_0 = -11,5 \text{ MPa}$.

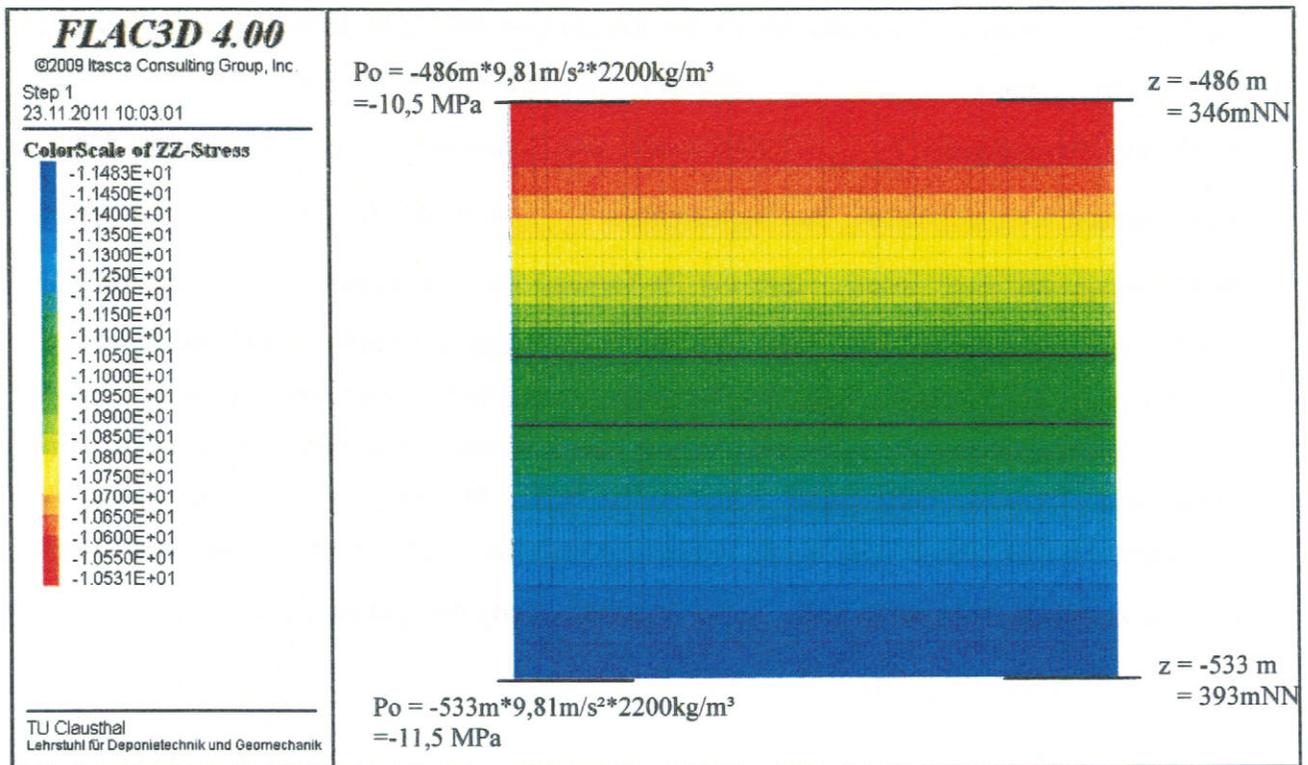


Bild 2.3.3: Vertikale Primärspannung

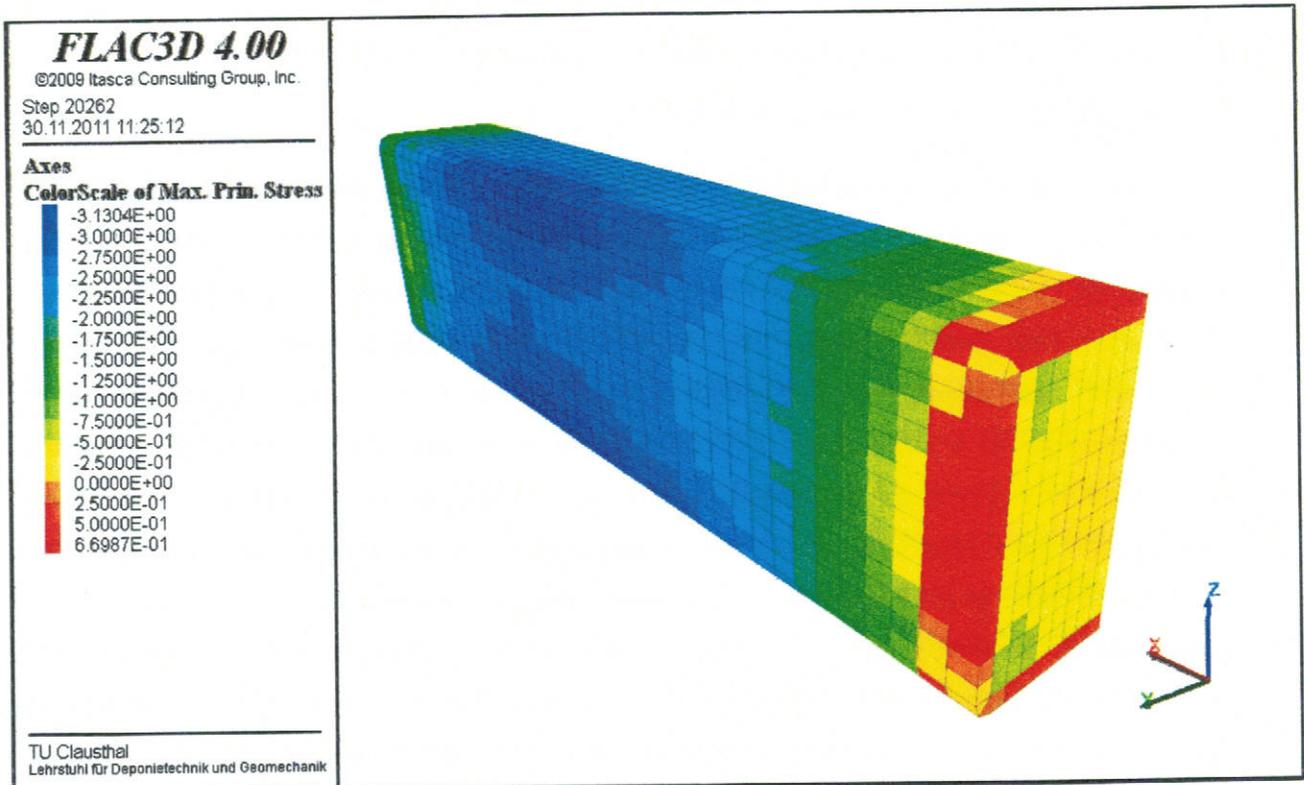


Bild 2.3.25: Viskose Berechnung bis $t = 12a$ – Maximale Hauptspannungen –
Detailansicht Verschlussbauwerk

Bezüglich der rechnerisch ermittelten Verschiebungen wird auf S.39 der Unterlage P264 ausgeführt: *Zur Überprüfung der Berechnung wird die Firstabsenkung beziehungsweise die Sohlhebung in der Mitte der freien Strecke am vorderen Rand des Modells ausgewertet. Über den betrachteten Zeitraum von 12 Jahren ergibt sich eine Firstsenkung von etwa 13mm und eine Sohlhebung von etwa 11mm.* Die im Rahmen der Verifikation durchgeführten Vergleichsberechnungen weisen mit ca. 15mm Firstsenkung und ca. 13mm Sohlhebung diesbezüglich vergleichbare Berechnungsergebnisse aus.

Die Verifikationsberechnungen haben damit insgesamt gezeigt, dass unter Verwendung einer weitgehend vergleichbaren Modellierung hinreichend ähnliche Berechnungsergebnisse erzielt werden, sodass die rechnerische Richtigkeit der in P264 dokumentierten Berechnungsergebnisse als gegeben eingeschätzt wird.

2.4 Verifikation der Berechnungen zum Verschlussbauwerk im Hauptanhydrit – Stand der Arbeiten

Zur Abtrennung der Restgrube gegen das Ostfeld ist im Rahmen der Stilllegung des ERAM die Errichtung eines Abdichtungsbauwerkes im Ostquerschlag der 4. Sohle im Hauptanhydrit beabsichtigt. Da Anhydrit aufgrund seiner elastischen bzw. elastisch-plastischen Materialeigenschaften kein Kriechvermögen besitzt, kann im Unterschied zu Abdichtungsbauwerken im viskosen Steinsalzgebirge eine zeitliche Zunahme der Einspannung des Bauwerkes in Folge konvergenter Verformungen nicht angenommen werden. Ziel der in P266 dokumentierten Ausführungen ist es vor diesem Hintergrund aufzuzeigen, dass durch die Verwendung eines quellfähigen Baustoffes ein Abdichtungsbauwerk errichtet werden kann, das unmittelbar nach Errichtung eine Vorspannung aufweist, die die Lagestabilität und den Lastabtrag gewährleistet. Die hierfür erforderlichen rechnerischen Nachweise zur Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit erfolgen in P266 durch numerische Berechnungen auf der Basis eines rotationssymmetrischen Berechnungsmodells und eines dreidimensionalen Berechnungsmodells. Ziel der rotationssymmetrischen Berechnungen ist es gemäß Aussage in P266, *das prinzipielle Tragverhalten des Abdichtungssystems unter Fluiddruckbeaufschlagung zu untersuchen und zu bewerten*. Die Berechnungen mit dem dreidimensionalen Berechnungsmodell erfolgen gemäß Aussage in P266 unter der Zielstellung, anisotrope Spannungszustände, nicht kreisförmige Hohlraumquerschnitte und die Wirkung von Klüften im Rahmen der Analyse des Tragverhaltens und der Dichtheit berücksichtigen zu können.

Zur Prüfung der zahlenmäßigen Richtigkeit der in P266 dokumentierten Berechnungsergebnisse sind entsprechend der Vorgehensweise in P266 durch die Prüfer zwei weitgehend identische Berechnungsmodelle – ein rotationssymmetrisches Berechnungsmodell STHA-ROTS sowie ein dreidimensionales Berechnungsmodell STHA-3D – erstellt worden. Eine Schemaskizze des für die Verifikationsberechnungen erstellten rotationssymmetrischen Berechnungsmodells STHA-ROTS zeigt Bild 2.4.1. Die Diskretisierung ist in Bild 2.4.2 dokumentiert.

Die geometrischen Modellabmessungen sowie Raumlage und Mächtigkeit der berücksichtigten Homogenbereiche sind identisch zu den in P266 ((Anlage 8.1) dokumentierten Angaben. Eine grundsätzlich gleich lautende Aussage gilt auch für die geometrischen Abmessungen der Streckenkontur. Unterschiede zwischen dem in P266 vom AS verwendeten Berechnungsmodell und dem für die Durchführung der Verifikationsberechnungen durch TUC erstellten Berechnungsmodell resultieren lediglich aus der Diskretisierung des Berechnungsgebietes.

Die im Rahmen der Verifikationsberechnungen zur Prüfung der zahlenmäßiger Richtigkeit der in P266 dokumentierten Berechnungen verwendeten Stoffmodelle, Materialparameter und Belastungsgeschichten wurden identisch zu denen des Antragstellers gewählt. Auf eine wiederholende Darstellung der Stoffmodelle, Materialparameter und Belastungsgeschichten wird unter Verweis auf die Ausführungen in P266, Abschnitt 8 im Rahmen des vorliegenden Zwischenberichtes verzichtet. Die Prüfung der rechnerischen Richtigkeit der in P266 dokumentierten Berechnungsergebnisse erfolgt planmäßig durch eine Gegenüberstellung der in P266 dokumentierten Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen eigener Berechnungen. Die graphische Auftragung der Berechnungsergebnisse in Inhalt und Darstellungsform orientiert sich an der in P266 gewählten Dokumentation, sodass Übereinstimmungen und/oder Abweichungen in den Berechnungsergebnissen visuell erkannt werden können.

Die Berechnungen sind noch nicht abgeschlossen. Bezüglich der Dokumentation und Bewertung der Berechnungsergebnisse wird auf den Schlussbericht verwiesen.

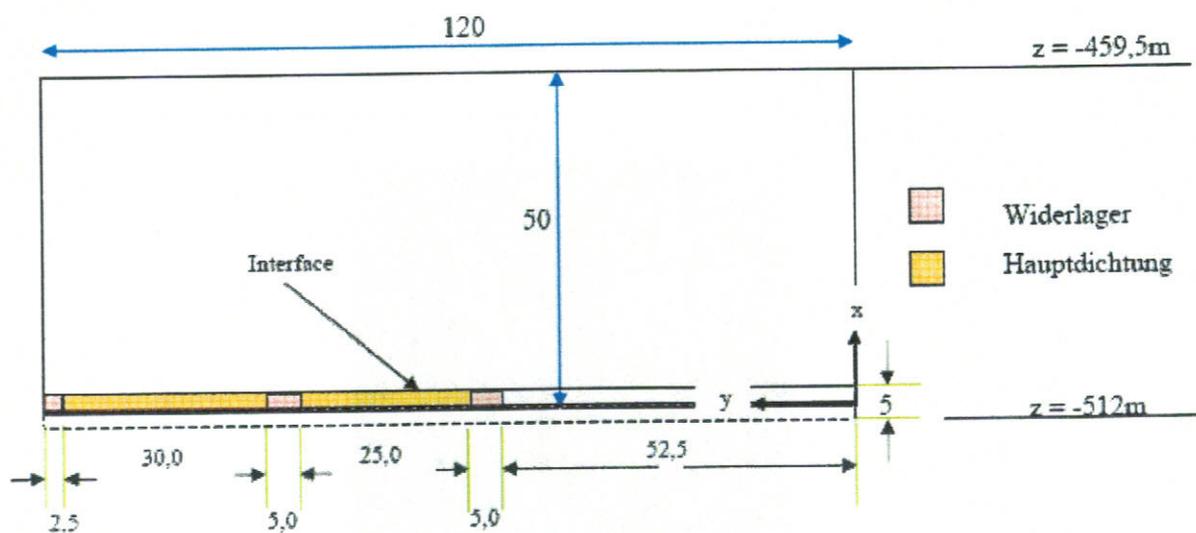


Bild 2.4.1: Schemaskizze Berechnungsmodell STHA-ROTS, Zahlenangaben in m

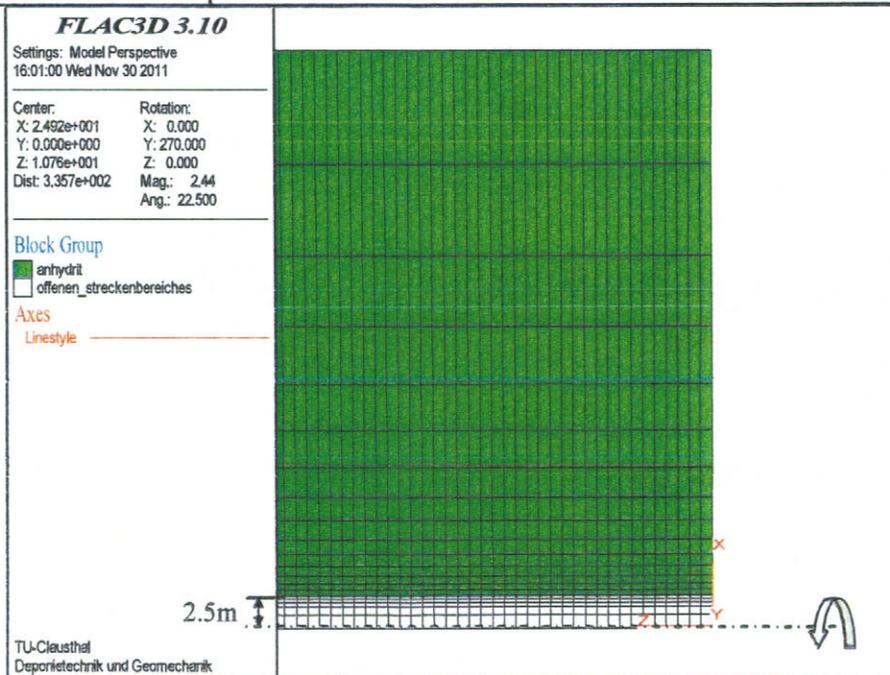
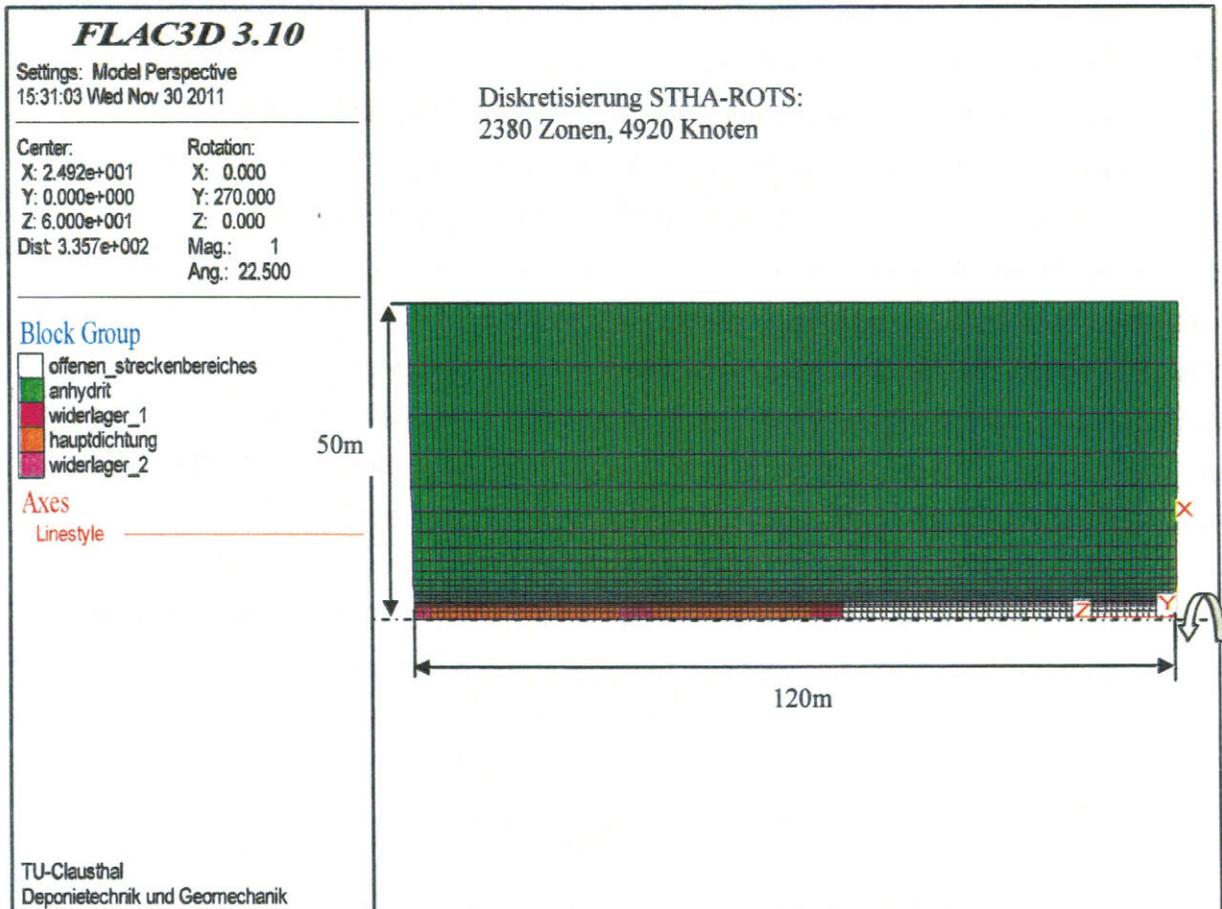


Bild 2.4.2: Diskretisierung Berechnungsmodell STHA-ROTS

Eine Schemaskizze des für die Verifikationsberechnungen erstellten dreidimensionalen Berechnungsmodells STHA-3D zeigt Bild 2.4.3. Die Diskretisierung ist in Bild 2.4.4 dokumentiert.

Die geometrischen Modellabmessungen sowie Raumlage und Mächtigkeit der Berücksichtigten Homogenbereiche sind identisch zu den in P266 ((Anlage 8.9) dokumentierten Angaben. Eine grundsätzlich gleich lautende Aussage gilt auch für die geometrischen Abmessungen der Streckenkontur. Unterschiede zwischen dem in P266 vom AS verwendeten Berechnungsmodell und dem für die Durchführung der Verifikationsberechnungen durch TUC erstellten Berechnungsmodell resultieren lediglich aus der Diskretisierung des Berechnungsgebietes.

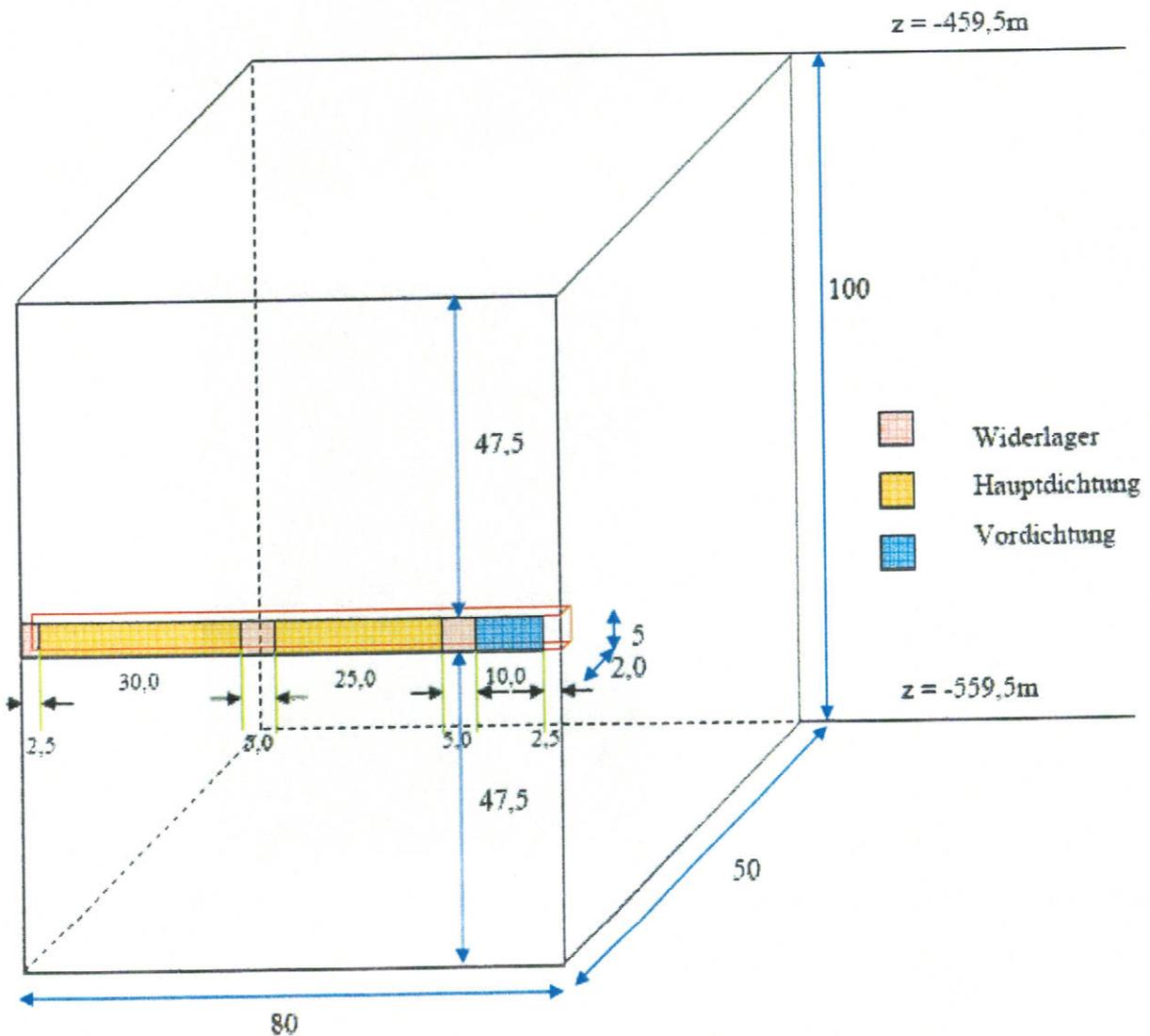


Bild 2.4.3: Schemaskizze Berechnungsmodell STHA-3D, Zahlenangaben in m

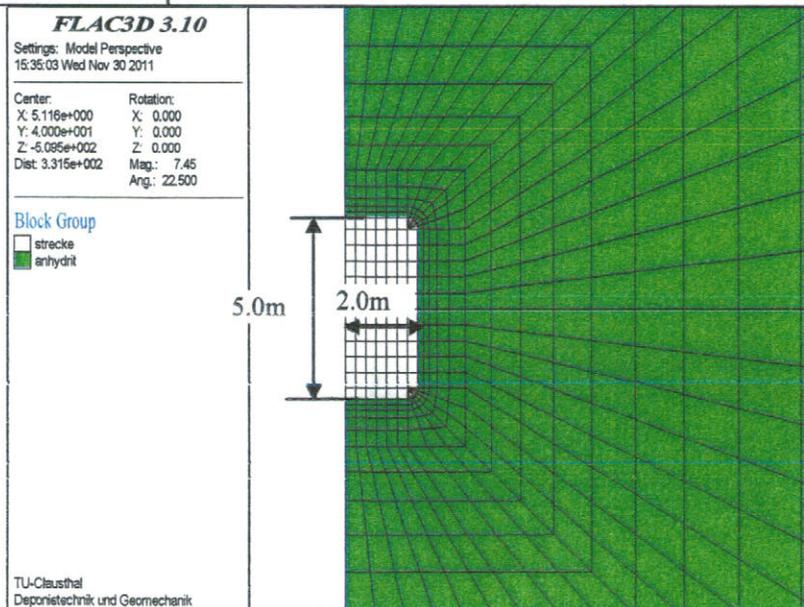
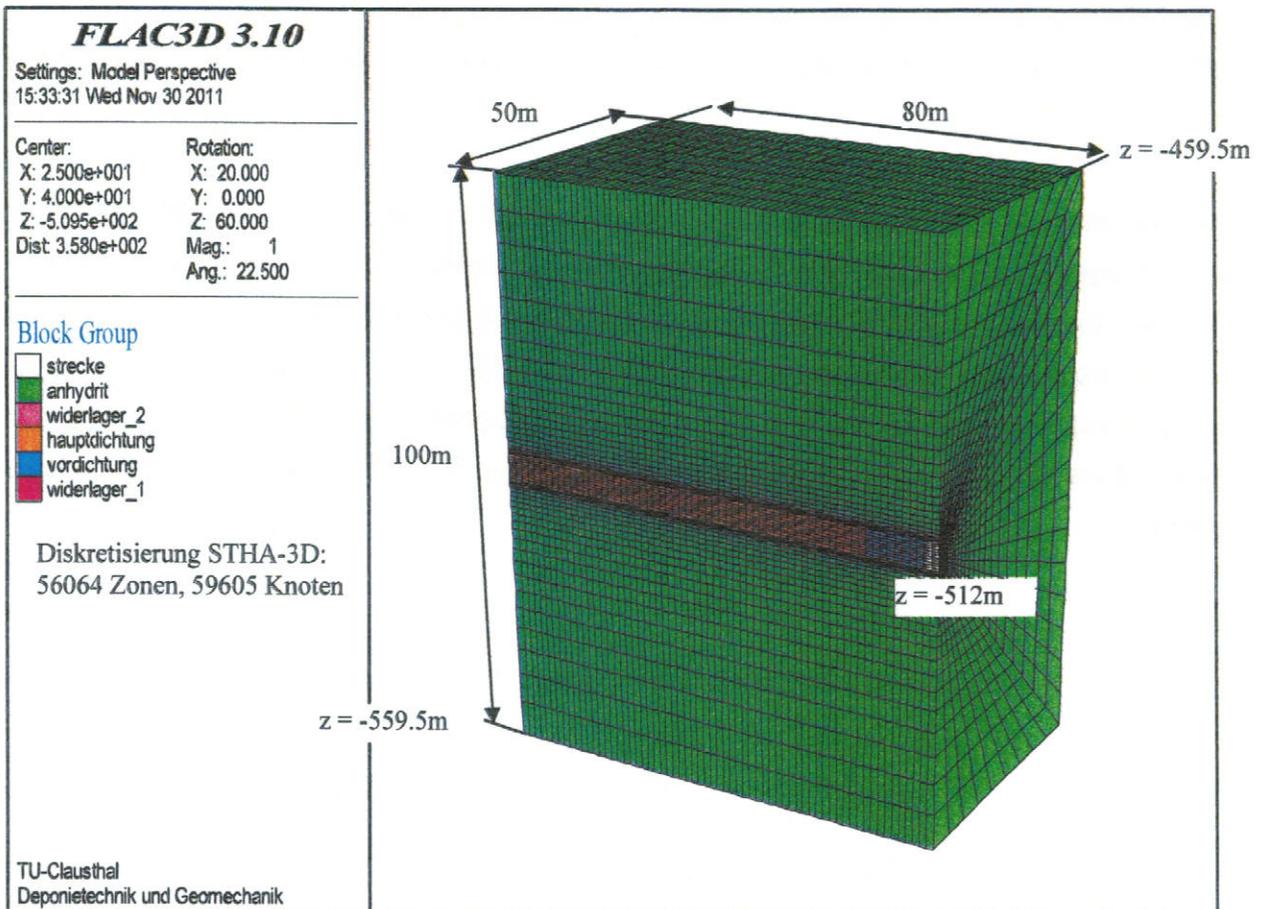


Bild 2.4.4: Diskretisierung Berechnungsmodell STHA-3D

2.6 Zwischenergebnisse zu den Verifikationsberechnungen und Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise

Im Ergebnis der in den vorstehenden Abschnitten 2.2 bis 2.5 dokumentierten Ausführungen zu den im Rahmen der Vergleichsberechnungen erarbeiteten Prüfungsbefunden sind als Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise festzuhalten:

Verschlussbauwerke im Steinsalz – P195:

- a) Die Ergebnisse der in P195 mit BF1, BF3 und BF4 bezeichneten mechanischen Berechnungsvarianten sind bezüglich der Größe der maximalen Hauptspannung (kleinste Druckspannung bzw. Zugspannung) mit dem AS zu erörtern. Im Rahmen der Verifikationsberechnungen konnte lediglich eine zahlenmäßige Übereinstimmung für die minimalen Hauptspannungen (größte Druckspannungen) bestätigt werden.
- b) Die Einschätzung des AS, dass *Zwangsspannungen zwischen Streckensaum und Abdichtungskörper nur entstehen können, wenn signifikant unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten vorhanden sind, die zu unterschiedlichen Dehnungen und damit zu Zwang aus Verformungsbehinderung führen*, wird durch die Prüfer nicht bestätigt. Auch wenn gemäß Aussage in P195 *der Wärmeausdehnungskoeffizient von Salzbeton M2 $4,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ beträgt und damit dem des Salzes, der ebenfalls $4,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ beträgt, entspricht*, kann nach Einschätzung der Prüfer nicht geschlussfolgert werden, dass *in der Kontaktfuge keine Zwangsspannungen aus Verformungsbehinderung in Folge Hydratationswärmeentwicklung auftreten bzw. nicht weiter betrachtet werden müssen*. Die Größe thermischer Spannungen ist bei behinderter Dehnung abhängig von den Parametern Wärmeausdehnungskoeffizient α_T , Verformungsmodul E und Temperaturdifferenz ΔT . Da benachbarte Elemente im Bereich des Streckensaumes auch bei identischer Größe des Wärmeausdehnungskoeffizienten unterschiedliche Verformungsmoduli und unterschiedliche Temperaturen ausweisen, sind thermisch induzierte Zwangsspannungen zu erwarten und auch zu berücksichtigen. Die in Abschnitt 2.2 diesbezüglich dokumentierten Berechnungsergebnisse der Prüfer dokumentieren eindeutig, dass bei Ansatz von $\alpha_T = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ für Versatz und Gebirge im Konturbereich zwischen Abdichtungsbauwerk und Steinsalzgebirge thermisch induzierte Zugspannungen ausgewiesen werden, die bei Ansatz der in P195 angesetzten Grenzwerte ein Zugversagen ausweisen. In der Konsequenz sind die in P195 dokumentierten Schlussfolgerungen bezüglich der Gebrauchs-

tauglichkeit und Standsicherheit des geplanten Abdichtungskonzeptes vom AS zu überarbeiten.

Temporäre Streckenabdichtungen – P264

- a) Bei der Festlegung der Bemessungsgrundlage für die Bewertung zulässiger Zugspannungen ist ein Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma = 1,8$ zu berücksichtigen. Die zulässige Zugbeanspruchung reduziert sich hierdurch von $\text{zul}\sigma_{C,Zug} = 1,5 \text{ MPa}$ auf $\text{zul}\sigma_{C,Zug} = 1,5 \text{ MPa}/1,8 = 0,83 \text{ MPa}$.
- b) Angesichts der auslegungsrelevanten Wirkung thermisch induzierter Zugspannungen sind die in P264 dokumentierten rechnerischen Untersuchungen nach Einschätzung der Prüfer nicht geeignet, die Gebrauchstauglichkeit der Abdichtungsbauwerke abschließend nachzuweisen. Erforderlich ist insbesondere eine thermo-mechanisch gekoppelte Berechnung mit Berücksichtigung der Hydratationswärmeentwicklung. Hierfür erforderlich ist u.a. eine Zusammenstellung der in das Hydratationsmodell eingehenden Parameter und der thermischen Parameter für den planmäßig eingesetzten Beton der Festigkeitsklasse C20/25 nach DIN 1045-1:2001-07.

In situ Abdichtungsbauwerk im Steinsalz – L12

- a) Für die Fortsetzung der Arbeiten im Rahmen der begleitenden Prüfung werden von den Prüfern benötigt:
 - Netzzugang mit Zugriff auf die Messdaten (pdf. und ASCII o.Ä.)
 - Dokumentation der Messtechnik (→Länge der jeweiligen Messstrecke)
 - Berechnungsergebnisse des AS zur Verifikation

3 Begleitende Prüfung der In-situ-Versuche

3.1 Vorbemerkungen und Zielstellung der Prüfungen

Vom Antragsteller war zunächst nur ein reiner Handhabungsversuch für die Streckenabdichtungen im Steinsalz vorgesehen. Laut Planungsstudie [NN-333] war nur die Demonstration der bautechnischen Realisierbarkeit eines Abdichtungselementes der beschriebenen Art vorgesehen, ohne Berücksichtigung eventueller Wechselwirkungen zwischen dem Abdichtungselement und dem umgebenden Gebirge. In der Adhoc-Stellungnahme [L01] vom 13.12.2007 wurde von den Gutachtern dagegen gefordert, den vorgesehenen Handhabungsversuch mit dem Anfangs-Funktionalitätsnachweis eines Abdichtungssegmentes zu verknüpfen. Auch wurde eine ausschließlich numerische Nachweisführung ohne parallelen gegenständlichen Nachweis aufgrund der im Modell erforderlichen Idealisierungen und Näherungen nicht für ausreichend eingeschätzt [L07].

Die begleitenden Prüfungen der In-situ-Versuche beinhalten

- eine begleitende Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung der bereits vorgelegten Unterlagen zu den In-situ-Versuchen sowie der gemäß einleitender Aufstellung nach derzeitigem Kenntnisstand zu erwartenden Unterlagen,
- begleitende rechnerische Untersuchungen zum In-situ-Versuch „Abdichtungsbauwerk im Steinsalz“ zur Verifikation der vom AS noch vorzulegenden Berechnungen, zur Prognose des Trag- und Dichtigkeitsverhaltens und zur Validation der Berechnungsannahmen durch eine rechnerische Reanalyse und onsite confirmation der durch Messungen in situ ermittelten Zustandsgrößen,
- begleitende Laboruntersuchungen zu den Materialeigenschaften der Abdichtungsbaustoffe und der Verbundeigenschaften „Abdichtungsbaustoff-Salzgebirge“.

Wie in den folgenden Kapiteln im Detail dargestellt, zeigen die vorliegenden Ergebnisse der Versuche in Bleicherode und im ERAM zu der Abdichtung von horizontalen Strecken (ausbleibender Ouelldruck im DBM2, unerwartete Rissbildung im M2), dass die von den Prüfern regelmäßig erhobenen Forderungen nach gegenständlichen Belegen der in der Konzeptplanung angenommenen Eigenschaften begründet und angemessen waren.

Mit Datum vom 30.06.2011 wurde durch die Projektgruppe ERAM am LAGB der Ergebnisbericht zur Charakterisierung und Bewertung der geologisch-bergbaulichen Standortgegebenheiten der vorgesehenen Abdichtungsbauwerke im ERAM vorgelegt. Das geplante Streckenabdichtungssystem mit Abdichtungen auf der 1. bis 4. Sohle wurde bis auf eine Abdichtung (Kontrollbereich 3. Sohle Westquerschlag) durch die PG ERAM gemeinsam mit BfS und DBE befahren und dokumentiert. Die Ergebnisse der der Befahrung, wie auch alle anderen auflaufenden neuen Informationen werden laufend bei der Bearbeitung des Prüfkomplexes berücksichtigt. Deshalb werden hier einige wichtige Aspekte aus dem LAGB Bericht aufgeführt.

Durch das LAGB wird auf eine Reihe von Sachverhalten verwiesen, die in der Detailplanung des Antragstellers berücksichtigt werden müssen und auch können, wie lokale Einbauten oder Folgen der Auffahrungsarten. Beim Ostquerschlag zwischen Kalilager D und dem Ostfeld auf der 2. Sohle (12YEQ01) wird vom LAGB die Frage aufgeworfen, ob durch die örtlichen Anhydritmittelsalze eine ausreichend hohe Konvergenz der Strecke vorliegt, so dass die Anfangspermeabilität der Salzbeton-Dichtelemente gewährleistet wird. Bei der Neuauffahrung der 1. nördlichen Richtstrecke nach Marie (15YER21) wurde auf der 3. Sohle auf einer Länge von ca. 100 m der Hauptanhydrit als durchgehende unzerblockte Scholle aufgeschlossen. Eine solche Anhydritscholle ist im Lagerstättenmodell an dieser oder ähnlicher Position nicht ausgehalten. Das LAGB regt an, das Lagerstättenmodell [P-044] oder Beschreibung des salztektonischen Baustils der Allertalzone [I-379] im Zusammenhang mit den Detailplanungen der Dichtelemente zu prüfen und ggf. zu überarbeiten.

3.2 Stand der Injektionsversuche für Abdichtungen in Steinsalz

Im Prüfbericht der AG Morsleben zur Prüfkomplex „Verfüllen und Verschließen von Strecken“, Teil 1 – Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung [L07] wurde gefordert, dass Übertragbarkeit der Injektionstechnologie auf die im ERA Morsleben anstehenden Verhältnisse gegenständlich zu belegen ist.

Am 19.07.2010 erfolgte ein Fachgespräch mit einer Laborbegehung an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe in Detmold [F07]. Dort wurden die ersten Grundsatzuntersuchungen und Vorversuche im Labor- und Technikumsmaßstab zum Injektionskonzept vorgestellt. Durch die Prüfer wurde dem Versuchskonzept grundsätzlich gefolgt.

Im Rahmen des Fachgespräches nach der Befahrung des Versuchsstandortes im ERAM am 22.09.2011 [F08] wurden weitere Ergebnisse der Injektionsversuche dargestellt. Die Versuchsergebnisse wurden von den Prüfern insgesamt als positiv und zielführend bewertet. Es

verblieben aber noch offene Fragen zum Verständnis der Versuchsergebnisse beim Füllen kleiner Kluftwurzeln. Weiterhin wurden der geplante Injektionsdruck sowie die Kontrolle der verpressbaren Materialmenge diskutiert. IGH führte aus, dass ein kombiniertes Druck-Mengen-Kriterium für jede Injektionsstufe angewendet wird. Gegenüber den ursprünglichen Planungen wird jetzt ein 4-stündiger Zyklus geplant („frisch in angedickt“).

Beim Fachgespräch [F09] vom 12.04.2011 informierte das BfS mit seinen Gutachtern über den Verlauf und die Ergebnisse der Injektion beim in situ Versuch im Steinsalz des ERAM, siehe Kapitel 3.3.

3.3 Stand der Versuchsdurchführung für Abdichtungen im Steinsalz

Eine erste Bewertung des Versuchskonzeptes der Planungsstudie erfolgte mit der „Adhoc-Stellungnahme“ [L01]. Weitere Erörterungen zum in situ Versuch im Steinsalz sind dokumentiert durch die Fachgesprächsprotokolle [F02] und [F03] und den Prüfbericht der AG Morsleben zur Prüfkomplex „Verfüllen und Verschließen von Strecken“, Teil 1 – Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung [L07]. Darin wurde von den Gutachtern regelmäßig gefordert, den vorgesehenen Handhabungsversuch des Abdichtungssegmentes mit einem belastbaren Funktionalitätsnachweis zu verknüpfen.

Die Planungsstudie zum In-situ-Versuch „Abdichtungsbauwerk im Steinsalz“ [I-366] wurde den Prüfern im September 2009 übergeben. Danach erweiterte das BfS die eigene Aufgabenstellung des Handhabungsversuches für die Demonstration der generellen technischen Machbarkeit um exemplarische Tests zur Prüfung der Funktionalität. Damit wurde von der 2007 vertretenen Aussage Abstand genommen, dass eine Untersuchung der Erreichbarkeit der erforderlichen Funktionsmerkmale u.a. an der eng begrenzten Untersuchungszeit für den in situ Versuch scheitert. In der Planungsstudie wurden die folgenden Punkte der Versuchsdurchführung erläutert:

- Kriterien und Findung des Versuchsstandortes,
- ergänzende Standortuntersuchungen,
- vorbereitende Maßnahmen am Standort,
- Installation der Einbauten und Messeinrichtungen
- Einbau des Dichtelementes,
- Injektion des Feinstbindemittels,
- stufenweise Druckbeaufschlagung (pneumatische Vortests, hydraulische Tests),
- begleitendes Messprogramm,
- Standortnachbereitung,
- ergänzende Untersuchungen.

Im Fachgespräch „Streckenverschlüsse“ am 10.12.2009 [F05] wurde die Planungsstudie [I-366] diskutiert und die weitere Vorgehensweise abgestimmt. Die Bewertung der AG Morsleben wurden in einer Präsentation vorgestellt, siehe Anlage zum Protokoll [F05]. Im Ergebnis der Diskussionen konnte den vorgeschlagenen Versuchsplanungen mit einer Standort-Neuauffahrung grundsätzlich zugestimmt werden, da die konkreten Auflockerungszonen ohnehin jeweils lokationsspezifisch zu bewerten sind. Eine hinreichende Übereinstimmung der Standortbedingungen zwischen In-situ-Bauwerk und den geplanten Streckenabdichtungen im Steinsalz wurde aus geologischer Sicht bestätigt. Klärungsbedarf wurde insbesondere hinsichtlich einer umfassenden Spezifikation des Baustoffs M2, der Durchführung und Wirksamkeit der Injektionsmaßnahmen sowie der Funktion der Trennbleche bzw. -folien gesehen. Dem Nachweis der Wirksamkeit der Injektionsmaßnahmen wurde besondere Bedeutung beigemessen. Diesen Fragen wurde durch den Antragsteller nachgegangen, siehe Kapitel 3.2.

Weiterhin wurde im Fachgespräch durch die Prüfer eingeschätzt, dass die geplante Messtechnik dem Stand der Technik bei dieser Art von in situ Versuchen entspricht. Bei den diskutierten TDR-Sensoren bestanden allerdings Bedenken, weil sie stoffliche Inhomogenitäten an den Installationsstellen erzeugen und auch die Messkabel wesentlich stärkere Störungen im stofflichen Aufbau des Versuchskörpers hervorrufen, als die anderen Messeinrichtungen. Es wurde empfohlen, dass die begleitenden geomechanische Prognoserechnungen rechtzeitig und methodisch umfassend bzw. abdeckend vor dem technischen Versuchsbeginn erfolgen sollten, um gegebenenfalls darauf reagieren zu können. Die Anisotropie des Baukörpers und der mechanisch-thermisch-hydraulischen Belastungszustände sowie das zeit- und temperaturabhängige Aufkriechens des Gebirges sollten beim rechnerischen Nachweis von Laststabilität und Funktionalität des Abdichtungsbauwerks berücksichtigt werden.

Weiterhin wurde die Durchführung von gebirgsmechanischen Versuchen an heterogenen bzw. permeablen Prüfkörpern empfohlen. Das Versuchsprogramm wurde in teils abgewandelter Form zum Bestandteil der aktuellen Bearbeitung von Teil 2 des Prüfkomplexes 7.

Im Fachgespräch [F05] wurde festgelegt, dass das BfS das MLU laufend über Zwischenergebnisse des Versuches informiert, um eine begleitende Prüfung zu ermöglichen. Das in diesem Zusammenhang diskutierte „monatliche Bulletin“ (wie bei bGZ) zum Stand der bzw. aller Versuche wurde bisher nicht umgesetzt, siehe auch letzter Punkt von Kapitel 2.6.

Am 18.06.2010 erfolgte das 3. Fachgespräch "Verfüllen und Verschließen von Strecken". Dort wurden die Ergebnisse der „Anforderungen an die Streckenverschlüsse aus Salzbeton, Ergebnisse der Prüfphase 1“ der Brenk Systemplanung [L08] sowie der „Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung“ der AG Morsleben [L07] vorgestellt und diskutiert. Die Ergebnisse bzw. Folgerungen bildeten die Grundlage der aktuellen Prüfungsphase 2.

Im Schreiben vom 09.06.2010 betreffs „Begleitende Prüfung in-situ-Versuch / Datenübergabe“ wurden vom BfS Karten und Daten übergeben bzw. angekündigt sowie ein Zeitplan für den in situ Versuch im Steinsalz genannt. Die Übergabe der Modellgeometrien an die TUC verzögerte sich bis ins Jahr 2011.

Am 22.09.2010 erfolgten eine Befahrung des Versuchsstandortes im ERAM sowie ein Fachgespräch zum Versuchsstand [F08]. Nach einer einführenden Information wurde der Standort des geplanten In-Situ-Bauwerkes auf der 2. Sohle befahren und der aktuelle Arbeitsstand durch die DBE erläutert. Zu diesem Zeitpunkt erfolgte im Bereich des Abdichtungsbauwerkes der zweite Schritt des Nachschnittes mit Polierkopf. Die Bohrungen von der Begleitstrecke zur Messstrecke waren bereits ausgeführt. Die Tests an Bohrungen der Standortuntersuchung und zur Bestimmung der konturnahen Auflockerungszone zeigten eine nur sehr geringmächtige Auflockerungszone. In der Begleitstrecke waren die Extensiometer- und Konvergenzmesspunkte installiert. Erste Ergebnisse zeigten eine relativ hohe Konvergenz (3 – 4 mm / 100 Tage). Die geologische Aufnahme hatte das bisherige Modell gut bestätigt (z2HS3, z2HS2 mit Sattelachse). Im nachfolgenden Fachgespräch wurden die bisherigen Ergebnisse sowie der weitere Versuchsablauf vorgestellt.

Die Gutachter bewerteten den bisherigen Versuchsablauf als zielführend und dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend. Es gab keine grundsätzlichen Einwände der Prüfer zu der geplanten weiteren Durchführung des Versuches. Einige Details wurden mit unterschiedlichen Auffassungen diskutiert. Übereinstimmung bestand darin, auf den Einsatz von TDR-Sonden zu verzichten. Die große Bedeutung der Injektionen für die Funktionalität des Bauwerkes wurde an allen Beteiligten unterstrichen. Unterschiedliche Auffassungen bestanden über die begleitenden gebirgsmechanischen Laborversuche der TUC an gelochten Großbohrkernen.



Bild 3.3.1: Versuchsstrecke für das Abdichtungsbauwerk im Steinsalz, ERAM 22.09.2010

Am 12.04.2011 erfolgte in Magdeburg ein Fachgespräch [F09] zum Thema der in situ Versuche. Durch das BfS und seine Gutachter DBE wurden die bislang erzielten Ergebnissen des In-situ-Versuchs „Abdichtbauwerk im Steinsalz“ dargestellt sowie ein Ausblick auf die noch ausstehenden Untersuchungen und zugehörigen Berichterstattungen gegeben. Die wichtigsten Ergebnisse weiterer Vorversuche können wie folgt zusammengefasst werden.

Vorversuche zur Haftzugfestigkeit zwischen Injektionsmittel und Steinsalz ergaben, dass nur mit UF 90 eine ausreichende Festigkeit erreicht werden kann.

In Voruntersuchungen zum Ausbohren des Hüllrohrs konnte die Umsetzbarkeit unter realen Bedingungen im ERAM gezeigt werden. Das Material zum Verfüllen des Hüllrohrs wird derzeit noch in Vorversuchen optimiert.

Weiterhin wurde dargestellt, dass die Instrumentierung und die Betonage des Versuchsbauwerkes am 15./16.12.2010 im ERAM planmäßig verliefen. Die Messinstrumente funktionieren bislang auch nach Betonage und Injektion einwandfrei. Diskutiert wurde die baulich integrierte Möglichkeit der Nachinjektion von Druckmesskissen.

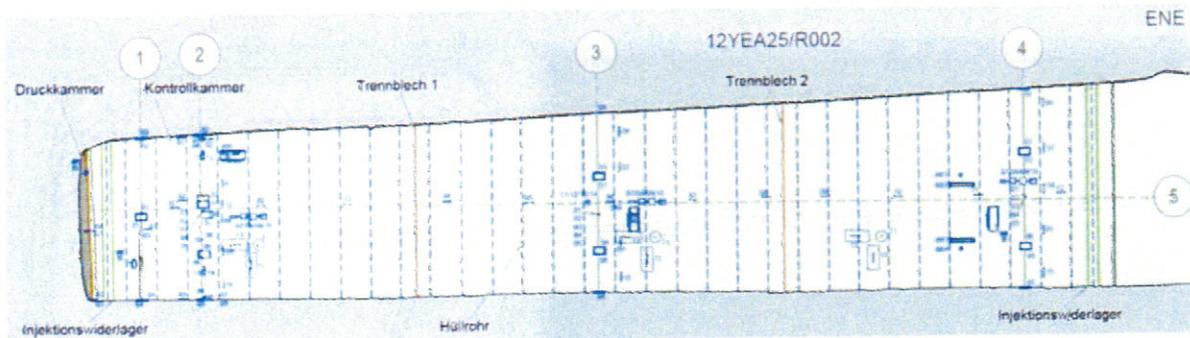
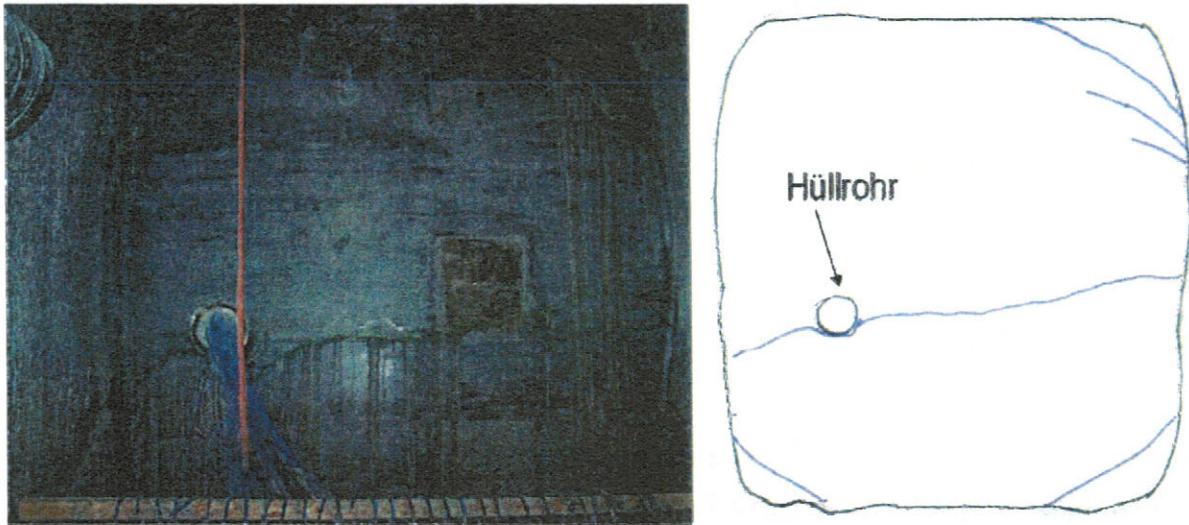


Bild 3.3.2: Schema des Versuchsbauwerkes im Steinsalz und seiner Instrumentierung
(Quelle: Vortrag DBE [F09])

Zum Einsatz kam die planmäßige Salzbetonrezeptur M2, lediglich der Anteil Zugabewasser wurde um etwa 4 % für eine bessere Verarbeitbarkeit erhöht. Laut Aussagen der DBE haben sich die Materialeigenschaften des eingesetzten Salzbetons M2 bzgl. der Betonage des Abdichtbauwerks als optimal erwiesen.

Die Injektion der Kontaktfuge erfolgte wie vorgesehen ca. 8 Wochen nach Fertigstellung des Betonkörpers nach dem modifizierten Injektionskonzept „frisch in angedickt“ (siehe FG 22.09.2010 [F08]) mit vier Injektionsstufen und zwischengeschalteten Spülungen. Bei den ersten beiden Injektionsstufen wurde UF 90 eingesetzt, bei den beiden folgenden Injektionen UF 30. Insgesamt wurden 1.125 Liter injiziert. Die Kontaktfläche zwischen M2-Baukörper und Gebirge beträgt zirka 375 m². Daraus lässt sich eine mittlere Schichtdicke des Injektionsmittels von etwa 3 mm ableiten. Für die Kontaktfuge mit den angebundenen Klüftigkeiten erscheint dieser Wert durchaus plausibel, auch wenn der Antragsteller diese Zahlenwerte beim Fachgespräch inhaltlich noch nicht bewerten wollte.

Ein unerwartetes Ergebnis war, dass bereits vor der Injektion luftseitig am Betonkörper mehrere Risse in den Eckbereichen der Ortsbrust identifiziert wurden. Ein Riss verläuft nahezu horizontal etwa im unteren Drittel der Bauwerkshöhe quer durch die gesamte Ortsbrust, siehe Bild 3.3.3. Die Deutung der Rissbildung ist Gegenstand aktueller Untersuchungen. An diesen Rissen wurden während der ersten Injektionsphase Austritte des Injektionsmittels festgestellt. Auf Nachfrage der Gutachter wird ausgeführt, dass daher in diesem Bereich eine weitere Injektion nicht möglich war (kein Druckaufbau). Von den Prüfern wurde eingeschätzt, dass die Klärung und Beseitigung der Ursachen der Risse eine hohe Wichtigkeit besitzt. Es wurde diskutiert, ob der horizontale Riss durch Haftspannungen am Hüllrohr verursacht sein könnte.



*Bild 3.3.3: Links: Foto der luftseitigen Ortsbrust nach Injektion, Risse grün markiert
Rechts: Schematische Darstellung der Risse
Quelle: Vortrag DBE [F09]*

Es erfolgten erste pneumatische Vortests. Druckreaktionen konnten in allen überwachten Injektionsleitungen beobachtet werden. Austritt von Tracergas wurde lokal am Horizontalriss der Ortsbrust registriert. Der Bereich der Kontaktfuge blieb dagegen ohne Detektionserfolg. Auf Nachfrage wollte der Antragsteller zu diesem frühen Versuchszeitpunkt noch keine abgeleiteten Werte der Anfangs-Gas-Permeabilität des Versuchsbauwerkes benennen.

Im Weiteren wurden die begleitenden numerischen Berechnungen erläutert. Angesichts der verfügbaren Details zur Geometrie des Bauwerkes (Laservermessung Kontur, Vermessung Sensorik) wurden zunächst 3D-Berechnungen (unter Verzicht auf vereinfachenden Symmetrieansatz) durchgeführt. Eine spätere Reduktion auf eine 2D-Simulation wird erwogen.

Am 12.07.2011 wurde durch das MLU ein Papier der DBE „Anhang: Vertiefte Darstellung des Untersuchungsprogramms nach Herstellung des Abdichtbauwerkes“ mit 2 Seiten Text und Tabellen sowie 2 Seiten Zeichnungen übergeben. Nach Durchsicht durch von IHU, TUC, BS und GTU wurde dem MLU mit Datum vom 29.07.2011 eine Stellungnahme übergeben.

Gemäß dieser Unterlage handelt es sich um einen Anhang zur Planungsstudie 9M/AJ/GH/BZ/0093/01 (DBE-Kennzeichnung). Diese Unterlage liegt uns unter der MLU-Registrierung I-366 in der Version vom 28.09.2009 vor. Weiterführende Unterlagen mit Ergebnissen oder Planungsangaben liegen offiziell im Verfahren nicht vor, nur die Informationen bzw. Vorträge aus den Fachgesprächen zum Prüfkomplex 7.

Gemäß dem übermittelten Untersuchungsprogramm sollen Kernbohrungen in der Längs- und Querachse des In situ-Bauwerks gestoßen werden. Dabei sollen insbesondere die folgenden Aspekte geprüft werden:

- Einhaltung der betontechnologischen Anforderungen,
- Anbindung des Betonkörpers an das Salzgestein,
- Injizierbarkeit der Kontaktzone und
- Nachweis einer ausreichend geringen Permeabilität.

Es sind insgesamt 10 Bohrungen in der Längsachse des Bauwerks vorgesehen:

- Mit drei Bohrungen (RA 511, RA 512, RA 514; Durchmesser 148 mm, Bohrlänge jeweils 10 m) soll die Kontaktzone untersucht werden. An den Bohrkernen sollen Versuche zur Ermittlung der Scherfestigkeit vorgenommen werden.
- Drei weitere Bohrungen (RA 510, RA 513, RA 515; Durchmesser 70 mm, Bohrlänge jeweils 10 m) sollen ebenfalls in der Kontaktzone gestoßen werden. In diesen Bohrungen sollen Versuche zur Ermittlung der In-Situ-Gaspermeabilität erfolgen. Die Bohrkernproben sollen hinsichtlich der Gas- und Fluidpermeabilität untersucht werden. Zudem sollen Dünnschliffe von diesen Bohrkernen angefertigt werden.
- Die vorstehend genannten Untersuchungen sollen auch in der Bohrung RA 516 (Durchmesser 70 mm, Bohrlänge 10 m) bzw. an den aus dieser Bohrung gewonnenen Kernproben durchgeführt werden. Zusätzlich sind Untersuchungen zur Ermittlung der Scherfestigkeit von Bohrkernproben vorgesehen. Mit dieser Bohrung soll die Kontaktzone zwischen dem mit Salzbeton verfüllten Bereich des überbohrten Hüllrohrs und dem Bauwerkskörper untersucht werden.
- Mit der Bohrung RA 328 (Durchmesser 70 mm, Bohrlänge 10 m) soll der Salzbetonkörper in der Längsachse des Bauwerks untersucht werden. Es sind Bohrlochmessungen zur Ermittlung der In-situ-Gaspermeabilität vorgesehen. An Bohrkernproben sollen Untersuchungen zur Ermittlung der Gas- und Fluidpermeabilität, Sättigungszustand, Gesamtporosität, einaxialer Zugfestigkeit, E-Modul und Kriechverhalten durchgeführt werden.
- Mit zwei weiteren Kernbohrungen (RA326 und RA327, Durchmesser 148 mm) sollen die in der Ortsbrust festgestellten Risse hinsichtlich ihrer Erstreckung erkundet werden. Die Bohrlänge wird im Text des Untersuchungsprogramms mit max. 3 m angegeben. (Anmerkung: In der Anlage 1 des Untersuchungsprogramms ist die Gesamtlänge dieser Bohrungen allerdings mit jeweils 10 m verzeichnet.)

Zusätzlich soll von der Begleitstrecke aus eine Bohrung quer zur Bauwerksachse gestoßen werden (RA 637; Durchmesser 70 mm, Länge 32,4 m). Dort sind Bohrlochmessungen zur Ermittlung der In-Situ-Gaspermeabilität vorgesehen.

Im Hinblick auf die Festlegung des Maximaldrucks der geplanten Druckbeaufschlagung soll der Spannungszustand des Abdichtbauwerks ermittelt werden. Die Ermittlung des minimalen Spannungszustandes soll mittels Hydrofrac-Messungen in zwei Bohrungen erfolgen, die von der Begleitstrecke aus quer zur Längsachse des Bauwerks (RA 508 und RA 509, Durchmesser 42 mm, 32,8 m bzw. 32,4 m lang) gestoßen werden soll.

Schließlich soll das Hüllrohr auf einer Länge von 24 m für die spätere Verfüllung mit Salzbeton überbohrt werden (Bohrdurchmesser ca. 340 mm). Nach dem Ausbohren des Hüllrohrs soll die Bohrlochwandung mittels Videoendoskopie bemustert werden. Im Ergebnis dieser Bemusterung sowie der Bohrungen zur Risserkundung sollen ggf. weitere Bohrungen zur Risserkundung gestoßen werden.

Für eine umfassende Bewertung des Untersuchungsprogramms müssen folgende grundsätzliche Informationen vorliegen:

1. Nachweiskonzept des Antragstellers zu den Streckenabdichtungen, aus dem die Zielstellung der Untersuchungen hervorgeht.
2. Vollständige Detailergebnisse der bei der Herstellung des In-situ-Bauwerks durchgeführten Prüfungen, Messungen und Untersuchungen sowie Dokumentation zur Herstellung.

Diese grundsätzlichen Informationen liegen uns nicht vor. Dazu stellen wir fest:

zu 1): Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit des ERAM sehen wir die Zielstellung des Untersuchungsprogramms darin, Informationen zur Rissfreiheit, zur Homogenität der chemischen und hydraulischen Parameter im Salzbeton und zur Permeabilität des In-situ-Versuchsbauwerks, differenziert nach Salzbetonkörper und Kontaktzone einschließlich Auflockerungszone, zu erhalten.

zu 2): Beispielsweise wurde durch Brenk Systemplanung beim Fachgespräch „Streckenabdichtungen“ am 12.04.2011 darauf hingewiesen, dass die Angaben zur Gesamtverformung des Bauwerks zum Zeitpunkt der Injektion (0,33 mm/m) und das daraus resultierende Schwindvolumen von ca. 400 l nicht mit dem Injektionsvolumen von 1.150 l harmoniert.

Es ist nicht auszuschließen, dass es im Versuchsverlauf im Bereich der Messquerschnitte oder grundsätzlich an Messeinrichtungen bzw. Hilfeinrichtungen dazu (Abspannungen etc.) zu Rissbildungen gekommen ist, die injiziert wurden. Sollte es zu einer solchen Rissbildung gekommen sein, so würde Klärungsbedarf bestehen, ob das In-situ-Bauwerk aufgrund dieser

Schwächezonen hinsichtlich der Spannungsbedingungen sowie hinsichtlich der Rissfreiheit als repräsentativ für die künftigen Streckenabdichtungen angesehen werden kann. Dieser Fragestellung kann mit dem vorgesehenen Untersuchungsprogramm nicht ausreichend nachgegangen werden, so dass erforderlichenfalls ergänzende Untersuchungen erforderlich wären.

Vorbehaltlich dieser grundsätzlichen Einschränkungen können wir zu den vorgesehenen Untersuchungen die folgenden Hinweise geben:

Zum zeitlichen Ablauf weisen wir darauf hin, dass Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Maßnahmen und Messungen bestehen, beispielsweise im Zusammenhang vorgesehener Rissverfolgung an der Luftseite des Versuchsbauwerkes. Das Überbohren des Hüllrohrs und die Verfüllung dieser Bohrung mit Salzbeton sollen gemäß Rahmenterminplan, der während des Fachgesprächs am 12.04.2011 vorgestellt wurde, vor Beginn des Druckversuchs erfolgen. Da beim Überbohren des Hüllrohrs Hinweise zur Entstehung der Risse verwischt werden könnten, sollte die Risserkundung für den die Ortsbrust querenden Riss jedoch vor dem Überbohren erfolgen. Andererseits kann die Rissverfolgung nur bis zu einer Bohrteufe von 2 m erfolgen, solange die Messungen im Messquerschnitt 4 nicht abgeschlossen sind. Ein aktueller Zeitplan zur Fortsetzung der einzelnen Messungen in den verschiedenen Messquerschnitten liegt uns nicht vor. Aufgrund solcher Abhängigkeiten ist uns auf der Basis der vorliegenden Informationen derzeit keine Einschätzung zur zeitlichen Abfolge der vorgesehenen Maßnahmen und Untersuchungen möglich. Wir gehen daher nachfolgend nur darauf ein, ob Vorbehalte zur generellen Durchführung der vorgesehenen Bohrungen und Untersuchungen bestehen.

Alle aus dem Bauwerkskörper (Salzbeton und Kontaktzone) gewonnenen Bohrkern sollten hinsichtlich der Rissfreiheit sowie der Homogenität von Salzbeton und Injektionsmaterial visuell untersucht und vollständig dokumentiert werden.

Alle Bohrkernabschnitte, die nicht für die vorgesehenen Untersuchungen verwendet werden, sollten als Rückstellproben aufbewahrt werden, um nachträglich ggf. weitere Untersuchungen (zur Homogenität der hydraulischen und chemischen Parameter) durchführen zu können.

Durch die begleitenden laborativen Untersuchungen durch die TUC wird eine Anforderungsliste für Kernmaterial der angekündigten Bohrungen erstellt und rechtzeitig über das MLU und das BfS an die DBE übergeben. Bei Mehrfachanforderungen für die Eigen- und Fremdanalytik erfolgt eine Abstimmung über die Prioritäten.

Wir empfehlen, dass die vorgesehenen Bohrlochmessungen zur Ermittlung der Gaspermeabilität abschnittsweise vorgenommen werden, so dass gezielte Untersuchungen zum Salzbetonkörper, zur Kontaktzone, zur Auflockerungszone und ggf. zu sonstigen relevanten Bereichen (z. B. Messquerschnitte, Umgebung der Trennbleche etc.) erfolgen.

Um abschätzen zu können, wie repräsentativ die vorgesehenen Bohrlochuntersuchungen zur Gaspermeabilität in Bezug auf die In-situ-Laugenpermeabilität sind, wären vergleichende Messungen beider Größen wünschenswert. Sofern diese Untersuchungen vom Antragsteller als nicht notwendig erachtet werden, sollte dies entsprechend begründet werden.

Es wird im Text und in der Anlage 2 des Untersuchungsprogramms darauf hingewiesen, dass Bohrungen mit einer Bohrlänge > 2 m in Bereichen mit geotechnischer Instrumentierung zu einem Ausfall der Sensoren führen können. Dieser Hinweis bezieht sich u. E. auf Bohrungen, die von der Ortsbrust aus in Längsachse des Bauwerks gestoßen werden sollen. Nach den uns vorliegenden Unterlagen würde der Messquerschnitt 4 mit den Bohrungen für Permeabilitätsmessungen und zur Probenahme wie auch mit den Bohrungen zur Rissverfolgung durchstoßen. Da dies die Messeinrichtungen gefährden würde, sollten die Bohrungen erst dann erfolgen, wenn alle Messungen mit den in Messquerschnitt 4 vorhandenen Einrichtungen abgeschlossen sind. Sollten die Bohrungen zur Rissverfolgung bereits frühzeitig und vor Beendigung der vorstehend genannten Messungen vorgesehen sein, so könnte die Bohrung RA 327 ggf. in einer ersten Phase nur bis zu einer Teufe von 2,0 m gestoßen werden und bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt werden.

Wir unterstützen den Untersuchungsansatz, dass die Bohrlochwandung und insbesondere den Rissbereich z. B. mittels Videoendoskopie zu bemustern und zu dokumentieren ist. Dies sollte vor der Fortsetzung der Bohrung wiederholt werden, um eventuelle Veränderungen der Rissweite und der Bohrlochwandung zu erkennen und zu dokumentieren.

Wie im Versuchsplan als Möglichkeit angedeutet, muss man davon ausgehen, dass die eine einzige Kernbohrung (RA 327) sehr wahrscheinlich nicht ausreichen wird, um die Ausdehnung, die Beschaffenheit und insbesondere die Ursache für den horizontalen Riss am Hüllrohr sicher klären zu können.

Unter Berücksichtigung einer Abbildung in der Tischvorlage der DBE zur Besprechung am 12.04.2011 ist davon auszugehen, dass sich die Messinstrumentierung des Bauwerks i. W. im Bereich der Messquerschnitte 1 bis 4 befindet sowie im Bereich zwischen Messquerschnitt 4 und Trennblech 2. Die Instrumentierung zu Messquerschnitt 3 ist nach dieser Abbildung in einem Abstand von > 11 m von der Ortsbrust zu erwarten. Bei Einhaltung der vorgesehenen Maximalbohrteufe der Bohrungen von 10 m in Längsachse des Bauwerks würden die Messquerschnitte 1 bis 3 nach den uns vorliegenden Unterlagen nicht durchstoßen und

wären daher nicht gefährdet. Lediglich von dem auf einer Gesamtlänge von 24 m vorgesehenen Überbohren des Hüllrohrs wären alle Messquerschnitte betroffen. Das Überbohren des Hüllrohres sollte daher nur erfolgen, wenn sich im Einwirkungsbereich der Bohrung keine Messeinrichtungen befinden oder wenn alle Messungen abgeschlossen sind, die durch die Bohrung beeinträchtigt werden könnten.

Das Untersuchungsprogramm der DBE nimmt den Diskussionsstand vom FG am 12.04.2011 auf und umreißt ein Versuchsprogramm, das bei flexibler Anwendung und bei Beachtung der erläuterten Abhängigkeiten den Anforderungen der Versuchsdurchführung grundsätzlich gerecht werden kann.

Beim Fachgespräch vom 30.08.2011 [F10] informierte die DBE im Auftrag des BfS über den aktuellen Stand der Versuchsdurchführungen. Es wurde berichtet, dass für das Hüllrohr, durch das die Injektionsleitungen im Bauwerk geführt werden, ein Material entwickelt wird, das in seiner Zusammensetzung dem beantragten Salzbeton M2 verwandt ist, zusätzlich aber ein deutlich verringertes Schwindverhalten aufweist. Zur Optimierung des technischen Verfahrens zum Überbohren des Hüllrohrs (spezielle Bohrkronen) laufen noch abschließende Untersuchungen. Im Bereich des in situ-Abdichtungsbauwerks sollen mit Hilfe von Kernbohrungen zusätzliche Erkenntnisse über Permeabilitäten, Festigkeiten und den Einspannungszustand des Bauwerks ermittelt werden. Das hierzu für den Zeitraum November / Dezember 2011 geplante Bohrkonzept wurde präsentiert und diskutiert. Zwischen DBE und TUC erfolgt dabei eine enge Abstimmung zu den Fragen der Gewinnung und Breitstellung der Bohrkerne.

3.4 Stand der Versuchsdurchführung für Abdichtungen im Hauptanhydrit

In Vorbereitung der Befahrung des Versuchsstandortes Bleicherode wurde vom BfS die „Versuchsplanung für Bauwerke im Hauptanhydrit zum Nachweis des dauerhaften Erhalts des Quelldrucks für das Magnesia-Bindersystem DBM 2“ [L06] übergeben. Am 16.02.2010 erfolgte dann eine Befahrung des Versuchsstandortes in Bleicherode sowie eine Fachdiskussion.

Bei der Befahrung wurden die Standorte für die Großbohrlochversuche im Steinsalz und die Versuchsstrecke im Anhydrit befahren. Zur Ermittlung des Quelldruckaufbaus des Baustoffs Magnesiabeton DBM2 in einer in situ-Strecke im Anhydrit wurde ein Streckenstummel durch Bohren und Sprengen neu erstellt, siehe Bild 3.4.1. Zur späteren Funktionsprüfung des Bauwerkes wurde eine Druckkammer im hinteren Teil des Streckenstummels errichtet, siehe

Bild 3.4.2. Die Widerlager sind als massive Bogenmauern ausgebildet. Um bei der Lösungsdruckbeaufschlagung ein flächenhaftes Anströmen des Bauwerks zu erreichen, wurden in das Widerlager an der Druckkammer Röhrrchen einbetoniert und die Oberfläche wurde mit einer Filtertresse bestückt.



Bild 3.4.1: Versuchsstrecke für das Abdichtungsbauwerk im Anhydrit, Bleicherode 16.02.10

Dem grundsätzlichen Versuchskonzept des Antragstellers konnte durch die Prüfer gefolgt werden. Zusätzlich zum aufgeführten Versuchsprogramm wurde vorgeschlagen, den Baustoff DBM2 hinsichtlich seines Phasenbestands zu mehreren Zeitpunkten zu untersuchen. Zusätzlich sollten Permeabilitätstests in der Kontaktzone durchgeführt werden. Das BfS sagte zu, diese Hinweise bei den weiteren Planungen zu berücksichtigen.

Nach diesem Termin im Februar 2010 gab es zunächst keine weiteren Informationen des BfS über den Versuchsablauf oder dessen Ergebnisse. Erst im Rahmen des Fachgespräches und der Befahrung des Versuchsstandortes im ERAM am 22.09.2010 [F08] wurde mitgeteilt, dass beim Versuch in Bleicherode kein dauerhafter Quelldruck aufgebaut werden konnte. Weitere Informationen konnten noch nicht gegeben werden, da BfS den Sachverhalt zunächst mit seinen Gutachtern bzw. Auftragnehmern für die Durchführung des Versuches klären wollte.

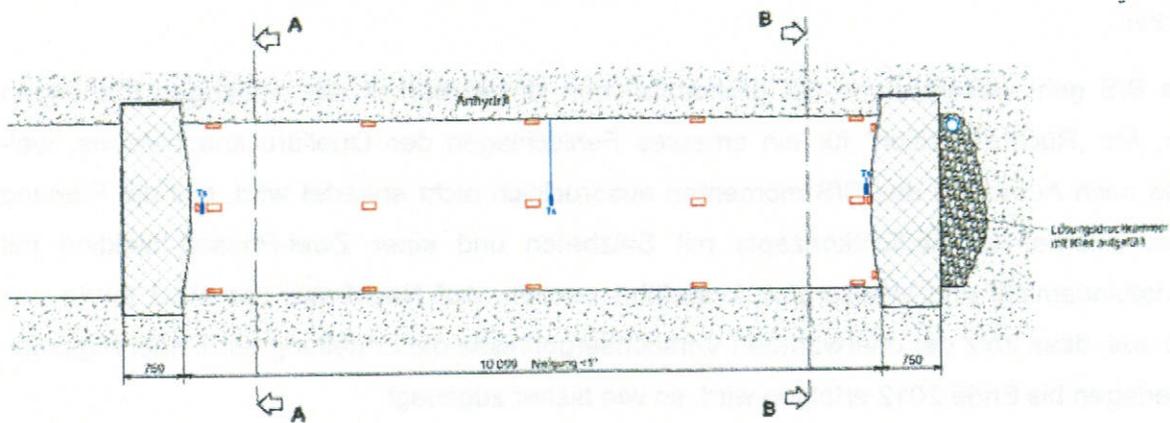


Bild 3.4.2: Bauwerksentwurf für den Versuch in Bleicherode nach Anlage 3 aus [L06]

Beim Fachgespräch [F09] vom 12.04.2011 informierte das BfS über den Verlauf und die Ergebnisse der Versuche zu den Abdichtbauwerken im Hauptanhydrit. Hinsichtlich des MgO-Quelldruckverhaltens werden zunächst die Versuchsergebnisse, welche am IfG mit der großen Versatzdruckzelle erzielt wurden, erläutert. Diese zeigten, dass der erforderliche Druck von mehr als 1 MPa über längere Zeiträume stabil bleibt. Anschließend werden Instrumentierung, Errichtung und Resultat des In-situ-Quelldruckversuchs vorgestellt. Die Ergebnisse können jedoch im Gegensatz zum Technikumsversuch an der Versatzdruckzelle das erwartete Druckverhalten nicht bestätigen. Nach anfänglichem Druckanstieg erfolgte ein kontinuierlicher Druckabfall. Im Vergleich zum Technikumsversuch war auch ein abweichender Temperaturverlauf zu verzeichnen. Im DBM2-Dichtelement wurden Kerntemperaturen von etwa 100 °C erreicht [F09].

Die Temperaturen im Kern blieben ca. 1 Woche oberhalb von 90°C. Die Druckkissen in der Kontaktfuge zeigten zunächst den erwarteten Verlauf mit einem temperaturbedingten Druckanstieg, gefolgt von einem Druckabfall infolge Abkühlung und einem erneuten Druckanstieg bis auf ca. 10 bis 20 bar durch die Phasenumwandlung. Danach fielen jedoch sämtliche Druckwerte kontinuierlich bis auf nahezu „0“ ab.

BfS verwies auf eine laufende Ursachenanalyse, wonach bislang verschiedene mögliche Einflussfaktoren überprüft werden, wie Temperaturverlauf und Phasenentwicklung, Luftanteil oder Rezepturabweichung. Das BfS sieht die Hauptursache des Versagens des Versuches in einer fehlerhaften Rezeptur (zu hohe Wasserzugabe). Auf Basis dieser Erkenntnisse sollen weitere In-situ-Versuche – zunächst im Großbohrloch und schließlich in einer Vergleichsstrecke – wiederholt werden, um die Machbarkeit des Verschlusskonzeptes belegen zu können. Kommende Versuche sollen im ERAM ausgeführt werden und nicht in anderen Bergwerken.

Das BfS geht weiterhin von der grundsätzlichen Umsetzbarkeit der bisherigen Planungen aus. Als „Rückfallposition“ für ein erneutes Fehlschlagen des Quelldrucknachweises, welches nach Aussagen des BfS momentan ausdrücklich nicht erwartet wird, soll die Planung eines alternativen Abdichtkonzeptes mit Salzbeton und einer Zwei-Phasen-Injektion mit Feinstbindemittel und Wasserglas fortgeführt werden. Auf Nachfrage des MLU führte das BfS aus, dass trotz der unerwarteten Versuchsergebnisse die Erstellung der Genehmigungsunterlagen bis Ende 2012 erfolgen wird, so wie bisher zugesagt.

Durch die Prüfer wurden verschiedene Vorschläge für ein Versuchsprogramm zur Ursachenprüfung am Bauwerk in Bleicherode eingebracht und diskutiert. Es wurde vorgeschlagen, die Rezeptur von Bleicherode an der großen Versatzdruckzelle de IfG bezüglich der Temperatur- und Quelldruckverläufe zu testen. Daneben wurden insbesondere Temperaturabhängigkeiten der Phasenumwandlungsprozesse sowie thermodynamische Maßstabeffekte diskutiert.

Beim Fachgespräch vom 30.08.2011 informierte das BfS über den Stand der Planungen für die weiteren Versuchsdurchführungen. Zur Ermittlung von Ursachen für das Ausbleiben des erwarteten Quelldrucks beim Versuchsbauwerk wurden Materialproben sowohl aus dem Versuchsbauwerk als auch zum Vergleich aus dem erfolgreich verlaufenen Quelldruckversuch beim IfG Leipzig untersucht. Neben chemischen Elementanalysen wurden auch qualitative und quantitative Phasenanalysen, kristall-morphologische Gefügeuntersuchungen, Quecksilberporosimetrie durchgeführt, um daraus Rückschlüsse auf die Materialzusammensetzung und die Einbauqualität ziehen zu können. Für die Wiederholung des Großversuches konnten noch keine Details genannt werden.

3.5 Begleitende Laboruntersuchungen zu den In-situ-Versuchen

Die Notwendigkeit, die Zielstellungen und der beabsichtigte Umfang der im Rahmen der Prüfungen zum In-situ-Versuch „Abdichtung im Steinsalz“ für erforderlich erachteten Laboruntersuchungen wurde durch TUC im FG am 10.12.2009 [F05] vorgetragen und durch das Schreiben der TUC vom 17.12.2009 schriftlich dokumentiert. Eine Stellungnahme des AS hierzu wurde mit Schreiben [REDACTED] B1256857 9M-830200 vom 16.03.2010 übermittelt. Eine Erörterung der teilweise unterschiedlichen Einschätzungen von TUC und BfS zur Notwendigkeit begleitender Laboruntersuchungen im Rahmen der Prüfungen zu den In-situ-Versuchen erfolgte im Rahmen des Fachgespräches am 18.06.2010 [F06]. Unter Bezug auf den vorstehend genannten Schriftwechsel und in Würdigung der in den Fachgesprächen geführten Erörterung sind nachstehende Laboruntersuchungen beabsichtigt:

- (a) Gemäß den Ausführungen des AS ist beabsichtigt, als Baustoff für das in situ Abdichtbauwerk Salzbeton der Qualität M2 zu verwenden. Mit den im Rahmen der bGZ durchgeführten Untersuchungen zur Festigkeit und Verformbarkeit des M2 sind im Grundsatz die grundlegenden Untersuchungsbefunde zu den mechanischen Eigenschaften des Dammbaumaterials vorhanden. Vorstehende Aussage gilt allerdings nicht für die hydraulischen Materialeigenschaften des Dammbaumaterials. Es ist daher beabsichtigt, aus den im Rahmen der Erstellung des Abdichtungsbauwerkes aus dem Förderstrom entnommenen Proben geeignetes Prüfkörpermaterial für die zur hydraulischen Charakterisierung weiterhin erforderlichen Permeabilitätsuntersuchungen auszuwählen. Durch den Prüfer TUC ist beabsichtigt, im Rahmen der unabhängigen Prüfung die hydraulischen Eigenschaften des M2 laborativ zu ermitteln. Als Indexprogramm sind vorgesehen 10 triaxiale Versuche unter variiertes mechanisch-hydraulischer Beanspruchung. Das für die Untersuchungen erforderliche Probenmaterial wurde durch DBE bereitgestellt und ist derzeit im geomechanischen Labor des Prüfers TUC gelagert. Versuche sind noch nicht durchgeführt worden.
- (b) Gemäß den Ausführungen des AS in der „Planungsstudie zum in situ Versuch Abdichtbauwerk im Steinsalz“ ist nach Abschluss der Druckbeaufschlagung beabsichtigt, u.a. Bohrkernmaterial parallel zur Längserstreckung des Abdichtungsbauwerkes aus der Kontaktfuge zwischen Steinsalzgebirge und Dammbaumaterial zu gewinnen und die Permeabilität des in situ abgebundenen Baustoffgemisches M2/Injektionsmittel im Kontakt zum Steinsalzgebirge mittels Triaxialversuchen zur Bestätigung der Funktionalität bzw. als Beleg für die Einhaltung der Nachweisziele zu

untersuchen. Im Rahmen der unabhängigen Prüfung ist beabsichtigt, eigene Vergleichsuntersuchungen durchzuführen. Das Prüfkörpermaterial wird gemäß Aussage des AS durch DBE zur Verfügung gestellt. Zum Zeitpunkt der Berichtslegung war die Prüfkörpergewinnung noch nicht abgeschlossen. Versuche wurden noch nicht durchgeführt.

4 Verzeichnis der Quellen

4.1 Verfahrensunterlagen

- I-022 Geologie des Ostfeldes, BGR, Juli 1996
- P-044 Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells
BGR, Hannover, Dezember 1997
- P-145 ERA Morsleben – Kriterien für das Verfüllen von Bohrungen, BfS,)M 2234021,
30.07.2002.
- G-148 ERA Morsleben – Systembeschreibung und Qualitätssicherungskonzept – Bohrloch-
verfüllung mit Magnesiabinder, BfS, 9M 22343021, 19.07.2002.
- P-174 Verfüllen untertägiger Bohrungen mit Magnesiabinder, BfS, 9M 66412031,
17.12.1999.
- P-177 [REDACTED] (2003): Nachweisführungen zur Langzeitsicherheit, zur Tragfähig-
keit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben. – Be-
richt (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 11.11.2003, P-177), Projektnummer EGB 00-
058), Erfurt.
- P-192 Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen – Materialeigenschaften und
Materialkennwerte Salzbeton M2, DBE, 17.11.2004.
- P-195 Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen - Konzeptplanung und
Nachweisführung, DBE, 28.06.2004.
- P-255 [REDACTED] (2007): Stilllegung Endlager Morsleben – Verfüllen von
Strecken mit hoher Anforderung – Bauzustände für horizontale Strecken (ergänzende
Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Salzbeton) und Nachweis-
konzept für das südliche Wetterrolloch, BfS.
- G-256 [REDACTED] (2007): Stilllegung Endlager Morsleben – Verfüllung von Strecken
mit hoher Anforderung – Konzept- und Systembeschreibung, BfS, 14.03.2007.
- P-262 [REDACTED] (2007): Numerische Untersuchungen zur Übertragbarkeit
der exemplarischen Nachweisführung der Streckenabdichtung von der 3. Sohle
auf die 4. Sohle, Zerna Ingenieure, 30.05.2007.

- P-263 Heimer, St., Wolfers, M., Scholzen, A.: Konzeptplanung und Nachweisführung für das Abdichten des südlichen Wetterrolllochs, Zerna Ingenieure, 14.02.2007.
- P-264 Pattenpohl, H., Pien, J.: Endlager Morsleben – Die Errichtung und Nachweisführung für die Funktionstüchtigkeit von temporären Abdichtungen, DMT, 31.01.2007.
- P-266 Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabeton; K-UTEC, Stand 17.09.2008,
- A-281 Plan zur Stilllegung des ERAM, BfS, Stand 31.03.2009
- A-282 Kurzbeschreibung der Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, Stand 31.03.2009
- G-296 Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtbauwerke im Steinsalz, DBE, Stand 26.02.2009
- P-298 Injektion von Abdichtungssegmenten mit Feinstsuspensionen; IGH Ingenieurgesellschaft Grundbauinstitut, Hannover, 26.02.2009
- NN-333 Planungsstudie für einen In-situ-Versuch zum Bau von Streckenabdichtungen aus Salzbeton, BfS, Laske, D. 2007
- I-343 MPA/ IBMB-TU Braunschweig: Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Salzbeton von Streckenverfüllungen, MPA Braunschweig, 06.03.2007.
- I-356 Geologische Grubenkartierung; Ostfeld, Grubenfeld Bartensleben 1.-4. Sohle, DBE, 05.09.1995
- I-360 Geologische Grubenkartierung; Nordfeld, Grubenfeld Bartensleben; 253 – 372 m NN Sohle, DBE, 27.02.1997
- I-366 Planungsstudie zum In-situ-Versuch „Abdichtungsbauwerk im Steinsalz“, DBE, 28.09.2009
- I-371 Zwischenbericht – Untersuchungen zum Quelldruckverhalten am MGO-Beton DBM2 in der großen Versatzdruckzelle des IfG),
- I-372 Versuchsplanung für Bauwerke im Hauptanhydrit zum Nachweis des dauerhaften Erhalts des Quelldrucks für das Magnesia-Bindersystem DBM2,
- I-374 Stellungnahme zu den gutachterlichen Prüfungen des In-situ-Versuchs „Abdichtung im Steinsalz“,
- I-375 Versuchskonzept für die Durchführung von Schwindversuchen im Steinsalz) sowie Untersuchungsprogramm zum in situ Versuch im Steinsalz, DBE, Juli 2011.
- I-379 Zusammenfassende Beschreibung des salztektonischen Baustils der Allertalzone im unmittelbaren Nahbereich des ERAM mit dem Schwerpunkt Baustil des westlichen Strukturbereiches (Scherzone), BGR, Behlau, 02.06.2010

4.2 Sonstige Literatur

- L01 Adhoc-Stellungnahme zur Unterlage: „Planungsstudie für einen in-situ-Versuch zum Bau von Streckenabdichtungen aus Salzbeton“
AG Morsleben, Stendal, 13.12.2007
- L02 Kurzstellungnahme zur Unterlage: „Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabeton“, AG Morsleben, Sep. 2008.
- L03 Kurzstellungnahme zur Unterlage P266 „Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabeton“
AG Morsleben, Stendal, 19.12.2008
- L04 Stellungnahme zum Nachweis der Korrosionsbeständigkeit von Abdichtungen aus Magnesiabeton im ERAM, Brenk Systemplanung GmbH, Aachen, 17.12.2008
- L05 Fortsetzung der Prüfung der Auslegungsreife der Unterlagen A280-282
AG Morsleben, Stendal, 25.06.2009
- L06 Versuchsplanung für Bauwerke im Hauptanhydrit zum Nachweis des dauerhaften Erhalts des Quelldrucks für das Magnesia-Bindersystem DBM 2,
K-UTEC AG Salt Technologies, Sondershausen, 19.01.2010
- L07 Prüfbericht im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des ERA Morsleben Prüfkomplex „Verfüllen und Verschließen von Strecken“, Teil 1 – Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung, AG Morsleben, Stendal, 26.04.2010
- L08 Prüfbericht im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des ERA Morsleben Prüfkomplex „Verfüllen und Verschließen von Strecken“, Anforderungen an die Streckenverschlüsse aus Salzbeton – Phase 1
Brenk Systemplanung, Aachen, 15.04.2010
- L09 Risswerk Morsleben, Stand 31.12.2010
- L10 Ergebnisbericht zur Charakterisierung und Bewertung der geologisch-bergbaulichen Standortgegebenheiten der vorgesehenen Abdichtungsbauwerke im ERAM;
Projektgruppe ERAM am LAGB; Halle, 30.06.11
- L11 Prüfbericht zu „Thermomechanische Berechnungen zur vorgezogenen Verfüllung des Zentralteils – Nachweis Bauzustände/stabiler Endzustand“ (DBE – T-EV1 / Kreienmeyer), AG Morsleben, 23.08.2002
- L12 DBE: ERAM, in situ-Versuch "Abdichtungsbauwerk im Steinsalz" - Dokumentation zum Berechnungsmodell und den -annahmen der numerischen Berechnungen -
ENTWURF
- L13 Itasca Consultants: FLAC3D Handbücher, Minnesota, USA, 2009
- L14 Elektronische Bibliothek Öl/Gas (russisch), <http://www.oglib.ru/tab1/tab14.html>
- L15 Protokoll zum FG vom 30.08.2011, Bericht zu den Geotechnischen Messungen zum in situ-Versuch Abdichtbauwerk im Steinsalz, DBE

5.3 Fachgespräche und Befahrungen

- F01 Fachgespräch und Protokoll: „In-Situ-Versuch“, Magdeburg 25.04.2008
- F02 Fachgespräch und Protokoll: „Streckenverschlüsse“, Magdeburg 11.06.2008
- L03 Fachgespräch und Protokoll: „In-situ-Bauwerk“, Magdeburg 10.12.2009
- F04 Fachgespräch und Protokoll: „Streckenverschlüsse“, Magdeburg 11.06.2008
- F05 Fachgespräch und Protokoll „In-situ-Bauwerk“, Magdeburg 10.12.2009
- F06 Fachgespräch und Protokoll: „Streckenverschlüsse“, Magdeburg 18.06.2010
- F07 Fachgespräch und Besprechungsnotiz, Detmold, 19.07.2010
- F08 Protokoll zur Befahrung und anschließendem Fachgespräch „In-situ-Versuch zur Streckenabdichtung im Steinsalz“, Morsleben 22.09.2010
- F09 Fachgespräch und Protokoll: „Streckenverschlüsse“, Magdeburg 12.04.2011
- F10 Fachgespräch und Protokoll: „Schacht- und Streckenverschlüsse“, Morsleben, 30.08.2011

